



Zvukově pohltivé vlastnosti vláknenného materiálu s rezonanční membránou

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil

Studijní obor: 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Autor práce: **Václav Škoda**

Vedoucí práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering



Sound Absorbing properties of resonant membrane fibrous material

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil

Study branch: 3106R016 – Textile Technologies, Materials and Nanomaterials

Author: Václav Škoda

Supervisor: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Václav Škoda

Osobní číslo: T16000568

Studijní program: B3107 Textil

Studijní obor: Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Název tématu: Zvukově pohltivé vlastnosti vlákenného materiálu s
rezonanční membránou

Zadávací katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných
materiálů

Zásady p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši na zadané téma.
2. Připravte vzorky materiálu s a bez úpravy pro testování.
3. Změřte požadované vlastnosti.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy **40-60 dle potřeby**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

- 1) Kolmer, F., Kyncl, J. Prostorová akustika, 1.vydání. SNTL Praha, 1980.**
- 2) Zwicker, C., Kosten C. W. Sound Absorbing Materials, Elsevier Pub. Co., NY 1949**
- 3) Škvor, Z. Akustika a elektroakustika. 1. vydání Academia Praha. 2001 ISBN 80-200-0461-0.**


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Klára Kalinová, Ph.D.


Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **13. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. května 2018**


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




prof. RNDr. David Lukáš, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 13. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucí práce Ing. Kláře Kalinové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Dále bych chtěl poděkovat za odbornou pomoc Ing. Elišce Hlouškové, Ing. Zdeňkovi Janatovi a Petru Šimkovi za poskytnutí potřebných informací, které mi pomohli zpracovat tuto bakalářskou práci.

Abstrakt

Tato práce v teoretické části pojednává o vlastnostech mechanického vlnění a pohlcování tohoto vlnění z hlediska porózních materiálů. V praktické části práce byly naměřeny hodnoty zvukové pohltivosti pro frekvenci v rozsahu 50 - 6400 Hz. Jako zvukově absorbující materiál byly zvoleny netkané vlákenné desky vyrobené technologií air laid. Vlákenné desky byly následně modifikovány různými materiály. Dále byly popsány výrobní technologie netkaných desek carNETEX. Praktická část je věnovaná samotnému měření zvukové pohltivosti netkaných desek carNETEX.

Abstract

This work in the theoretical part deals with the properties of mechanical wave and the absorption of this wave in terms of porous materials. In the practical part of the thesis the sound absorption values for the frequency range 50 - 6400 Hz were measured. Non-woven porous materials made by air laid technology were chosen as the sound-absorbing material. Porous plates were subsequently modified by different materials. There were described the manufacturing technologies for carNETEX non-woven plates. The practical part is devoted to the measurement of the sound absorption of non-woven carNETEX plates.

Klíčová slova

Zvuková pohltivost, akustika, zvuk, frekvence, mechanické vlnění, impedanční trubice, rezonanční membrány, netkané textilie

Key words

Sound absorption, acoustics, sound, frequency, mechanical waves, impedance tubes, resonance membranes, nonwovens

Obsah.....	9
Seznam použitých symbolů.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	13
Úvod.....	14
1. Akustika.....	15
1.1 Rozdělení akustiky.....	15
1.2 Vlastnosti akustiky.....	15
1.2.1 Akustický výkon.....	15
1.2.2 Hladina akustického výkonu.....	16
1.2.3 Hladina akustické intenzity.....	16
1.2.4 Akustický tlak.....	16
1.3 Zvuk.....	17
1.4 Mechanické vlnění.....	18
1.4.1 Rovnice postupného vlnění.....	19
1.5 Stojaté vlnění.....	20
1.6 Lom vlnění.....	21
1.7 Ohyb vlnění.....	21
1.8 Chvění mechanických soustav.....	21
2. Šíření zvuku.....	22
2.1 Zvuk ve volném prostoru.....	23
2.2 Útlum zvuku ve vzduchu.....	23
2.3 Útlum zvuku ohybem přes překážku.....	24
2.4 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru	24
3. Porózní materiály.....	24
3.1 Porózní pohlcovače.....	25
4. Zvuková pohltivost vláknenných materiálů.....	26
4.1 Činitel zvukové pohltivosti.....	26
4.2 Mechanika pohlcování zvuku.....	28
4.3 Akustické rezonanční membrány.....	29
4.4 Kmitající membrány.....	29
4.5 Helmholtzovy rezonátory.....	30
4.6 Rezonanční efekt nanovláknenné vrstvy.....	31

5. Charakteristiky zvukově pohltivých porózních materiálů.....	32
5.1 Tloušťka.....	32
5.2 Průměr vláken.....	32
5.3 Zaplnění.....	33
5.4 Anizotropie.....	33
5.5 Hustota polymeru.....	33
6. Metody měření zvukové pohltivosti.....	33
6.1 Dvou mikrofónová impedanční trubice.....	33
6.2 Dozvuková místnost.....	34
6.3 Metoda odražené vlny.....	35
7. Netkané textilie.....	36
7.1 Technologie netkaných textilií.....	36
7.2 Výroba netkaných textilních desek carNETEX.....	38
7.2.1 Aerodynamická výroba netkaných textilií.....	39
7.2.2 Termické pojení.....	40
7.2.2.1 Teplovzdušné pojení.....	40
7.2.2.2 Pojení kalandrem.....	42
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
8. Příprava vzorků.....	45
8.1 Měření činitele zvukové pohltivosti.....	46
8.2 Návod obsluhy dvoumikrofónové impedanční trubice.....	46
8.3 Vyhodnocení činitele zvukové pohltivosti měřených vzorků.....	47
8.4 Obrázky připravených vzorků na měření.....	49
8.5 Zpracování výsledků.....	54
8.6 Průměrné výsledky všech vzorků.....	72
9. Závěr.....	73
10. Seznam literatury.....	74
11. Seznam obrázků.....	77
12. Seznam tabulek a grafů.....	78

Seznam použitých symbolů

dB - decibel jednotka akustických hladin

D - průměr (mm)

d - tloušťka materiálu (mm)

f - frekvence (Hz)

f_r - rezonanční kmitočet soustavy (Hz)

Hz - hertz jednotka frekvence

H_i - frekvenční přenosová funkce

H_i - frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou

H_e - frekvenční dopadající složka související s odraženou složkou

I - intenzita zvuku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

I_0 - referenční hodnota intenzity zvuku (dB)

L_I - hladina akustické intenzity (dB)

$L_{p,d}$ - hladina akustického tlaku (dB)

L_w - hladina akustického výkonu (dB)

m - metr jednotka vzdálenosti

mm - milimetr jednotka vzdálenosti

m^2 - jednotka plochy

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – jednotka rychlosti

Pa – pascal jednotka tlaku

P - efektivní hodnota akustického tlaku (Pa)

P_0 - referenční hodnota akustického tlaku (Pa)

P_a - pohlcený výkon (W)

P_r - odražený výkon (W)

P_t - ztracený výkon (W)

p_b - barometrický tlak (Pa)

S - plocha (m^2)

s - sekunda jednotka času

T - perioda (s)
t - teplota ($^{\circ}\text{C}$)
V - objem (m^3)
v - rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 V_t - rychlost vzduchu o dané teplotě ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $^{\circ}\text{C}$)
W - watt jednotka výkonu
W - akustický výkon
 W_0 - referenční hodnota akustického výkonu (W)
X - délka vzdálenosti (mm)
Z - zdroj vlnění
 α - činitel pohltivosti
 ρ - činitel odrazu
 τ - činitel průzvučnosti
 λ - vlnová délka (m)
 φ - zvuková pohltivost pro různé úhly dopadu (α)
 π - matematická konstanta
sin - goniometrická funkce ($^{\circ}$)
 $^{\circ}\text{C}$ - celsiův stupeň jednotka teploty
 $^{\circ}$ - uhlový stupeň

I TEORETICKÁ ČÁST

Úvod

Zvuk můžeme obecně nazvat jako mechanické kmitání, které je charakterizováno pomocí pohybu částic pružného prostředí nebo u vlnového pohybu parametry zvukového pole. V dnešní době většina zvuků, které jsou v zájmu vědy, prokazují nežádoucí akustické signály, tyto signály nazýváme hlukem. Existují rozsáhlé výzkumy, zabývající se zvuky, které jsou vytvářeny stroji různých typů. Zvuky nás obklopují v běžném životě každý den, některé působí na naše sluchové ústrojí příjemně, zatímco jiné zvuky se jeví jako rušivé a obtěžující. Obtěžující zvuky a jejich škodlivého působení na člověka vede k mnoho opatřením, jejichž výsledkem je řada zákonů, norem a jiných právních předpisů, zajišťujících ochranu lidí před tímto nadměrným hlukem a vibracemi. Jednou z velkých závažností hluku je, že se zvuk šíří na velké vzdálenosti stovky metrů i více. Přitom se šíří stejně dobře vzduchem, vodou i pevnou hmotou. Za určitých podmínek se může akustické vlnění odrážet, lomit i ohýbat.

Zvuková pohltivost znamená snížení zvukové energie měřené v jedné místnosti. Je to vlastnost materiálu či daného povrchu pohlcovat zvukovou energii. Zvukovou pohltivost lze definovat jako rozdíl mezi zvukovou energií dopadající na povrch a zvukovou energií odraženou od tohoto povrchu. Absorpční vlastnosti materiálu se udávají v intervalu od 0 do 1, kdy 1 znamená absolutní pohltivost materiálu. Tento činitel je označován jako α (alfa) a je to poměr absorbované energie k celkové zvukové energii, která přichází k objektu. Čím menší je tento koeficient, tím větší jsou zvukové ozvěny rezonance v prostoru.

Mezi materiály, které jsou schopny absorbovat či zlepšovat akustickou pohltivost patří i textilní materiály. Nemají nejlepší mechanické vlastnosti, neodolávají moc dobře přírodním vlivům, ale mají v celku jednoduchou zpracovatelnost a jsou ekonomicky dostupné a na rozdíl od pěn nejsou ekonomicky závadné. Díky těmto vlastnostem textilních materiálů je v dnešní době velká obliba tyto materiály využívat a nadále je modifikovat k ještě lepším výsledkům.

1. Akustika

Akustika je definována jako vědní obor, který se zabývá fyzikálními ději, jež jsou spojeny se vznikem mechanického vlnění, jeho dalším šířením a vnímáním zvuku. Vlnění v hmotném prostředí o jehož existenci se můžeme přesvědčit sluchem, se ve fyzice i běžné řeči nazývá zvuk. Akustika patří mezi nejstarší obory fyziky a rozděluje se do více kategorií podle oblasti zájmu.

1.1 Rozdělení akustiky^{[4][7]}

1. Fyzikální akustika – studuje způsob vzniku a šíření zvuku. Dále se zabývá jeho odrazem a pohlcováním v různých materiálech.
2. Hudební akustika – zkoumá zvuky a jejich kombinace se zřetelem na potřeby hudby.
3. Fyziologická akustika – se zabývá vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu.
4. Stavební akustika – zkoumá dobré a nerušené podmínky poslouchatelnosti hudby a řeči v obytných místnostech a sálech.
5. Elektroakustika – se zabývá záznamem, reprodukcí a šířením zvuku s využitím elektrického proudu.

1.2 Vlastnosti akustiky

Jsou vlastnosti, které se zabývají zákonitostmi šíření akustického vlnění včetně jejich matematického popisu a technických aplikací. Lze říci, že tyto vlastnosti lze popsat pomocí údajů jako frekvence nebo intenzita.

1.2.1 Akustický výkon^[4]

Akustický výkon W (W) je důležitou charakteristikou zvuku, využíváme ji k porovnání zvuků mezi sebou. Je měřítkem celkové akustické energie, která prochází danou plochou. Je základní nejdůležitější veličinou akustické vlastnosti zdroje zvuku.

1.2.2 Hladina akustické výkonu^[4]

V technické akustice byl zaveden pojem hladin akustických veličin, jejichž veličinou je decibel (dB). Hladina akustického výkonu L_w (dB) je definována vztahem :

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (1.2.2.1)$$

kde W (W) je sledovaný akustický výkon a W_0 je referenční hodnota akustického výkonu ($W_0 = 10^{-12} \text{ W}$).

1.2.3 Hladina akustické intenzity^[4]

Hladina akustické intenzity L_I (dB) je definován vztahem:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.2.3.1)$$

kde I (W.m^{-2}) je intenzita zvuku sledovaného akustického signálu a I_0 je referenční hodnota intenzity zvuku ($I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$).

1.2.4 Akustický tlak^[4]

Pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina, kterou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu nebo pásmu kmitočtů. Pouhý údaj hladiny akustického tlaku nemá význam, neboť neříká nic o poloze signálu na kmitočtové ose. Hladina akustického tlaku L_p (dB) je definována vztahem:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (1.2.4.1)$$

kde P (Pa) je efektivní hodnota akustického tlaku a P_0 je referenční hodnota akustického tlaku (pro vzduch $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$).

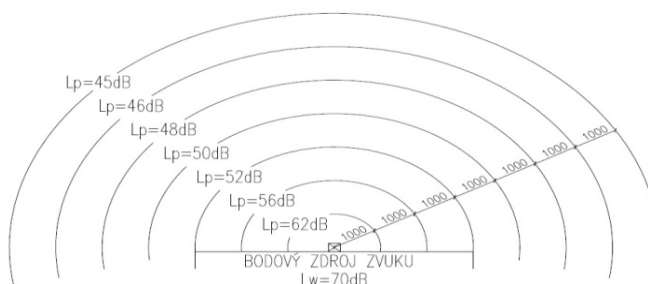
1.3 Zvuk^{[1][9][4]}

Zvuk je mechanické vlnění, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím. Mechanické vlnění se šíří látkami všech skupenství pomocí vazebných sil působících mezi částicemi, atomy a molekulami. Prostřednictvím těchto vazeb se přenáší rozruch z jednoho bodu na druhý. Nejpřehlednější je vlnivý pohyb v bodové řadě, kdy jedna její částice začne kmitat. Vznikne lineární postupná vlna. Body prostředí mohou kmitat v libovolných směrech.

Mechanickým vlněním pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 16 až 20 000 kmitů za sekundu se nazývá zvuk. Existují tři frekvenční pásma:

1. Infrazvuk – mechanické vlnění pružného prostředí s frekvencí $f < 16$ Hz.
2. Slyšitelný zvuk – mechanické vlnění pružného prostředí ve frekvenčním pásmu od 16 Hz do 20 kHz.
3. Ultrazvuk – mechanické vlnění pružného prostředí s frekvencí $f > 20\,000$ Hz.

Zvuk se šíří podélným nebo příčným vlněním. V kapalinách a plynech nastává pouze podélné vlnění, tento typ vlnění se vyznačuje stejným směrem šíření vlny jako směr kmitání jednotlivých částí hmoty. Díky tomu, že pevné látky mají vlastnost vykazování pružnosti v tahu i tlaku, ale také smyku může se vlnění vyskytovat podélné i příčné a nebo jejich kombinace. Toto vlnění se od zdroje šíří ve vlnoplochách. Vlnoplocha je množina bodů v prostoru, kde tyto body dorazí na určitá místa ve stejném okamžiku se stejnou fází.



Obr. 1 šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch dle 25.

1.4 Mechanické vlnění^{[1][5][9]}

Zdrojem akustického vlnění je jakýkoliv objekt, který kmitá kolem rovnovážné polohy. Kmitavý pohyb se šíří od jedné částice k druhé například pomocí molekulových sil či jinými vazebnými silami mezi částicemi. Šíření není spojeno s přenosem látky, ale přenáší energii. Kmitání jedné částice rozkmitává další částici spojenou vzájemnou vazbou. Současně se na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové to prostředí se označuje jako pružné prostředí. Pomocí přenosu kmitání mezi jednotlivými částicemi pružného prostředí se vytváří vlna. Hmotný bod, který je zdrojem vlnění, kmitá harmonicky, vzniká mechanická vlna sinusového průběhu. Platí vztah:

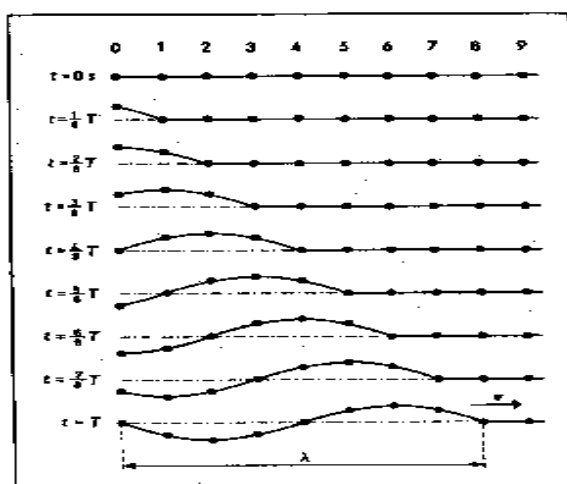
$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \quad (1.4.1)$$

λ - vlnová délka (m)

v - rychlost postupného vlnění (m.s^{-1})

T - perioda (s)

f - frekvence kmitání (Hz)



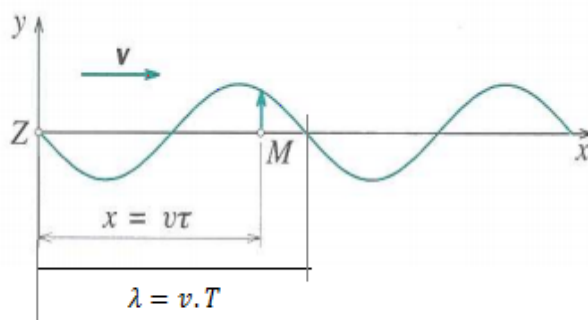
Obr.2 postupné vlnění v řadě bodů dle 25.

Akustické neboli mechanické vlnění se dělí podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu. Při postupném vlnění příčném hmotné body pružného prostředí kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje. Postupné

vlňení podélné se vyznačuje tak, že částice kmitají ve směru, kterým vlňení postupuje. Vzniká ve všech skupenstvích tedy i v kapalinách a plynech.

1.4.1 Rovnice postupného vlňení^{[5][9]}

Postupné mechanické vlňení je popsáno vztahem, který umožňuje určit okamžitou výchylku v každém bodě řady, kterou se vlna šíří. Tato výchylka nezáleží jenom na čase t , ale také na vzdálenosti x od zdroje vlňení (počátečního bodu řady). Výchylka kmitavého pohybu se mění podle funkce $y = y_m \sin \omega t$. Postupné vlňení se šíří řadou bodů od zdroje Z , který kmitá harmonicky. Následující obrázek popisuje rovinnou vlnu v řadě bodů.



Obr.3 odvození postupného vlňení dle 26.

Z - zdroj vlňení

λ - vlnová délka (m)

v - rychlost šíření vlňení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

τ - doba, za kterou dospěje vlňení do bodu M (s)

T - perioda (s)

Postupné vlňení se šíří řadou hmotných bodů ze zdroje Z , který kmitá harmonicky. Rychlost vlňení je v . To znamená, že do bodu M ve vzdálenosti x od zdroje vlňení dospěje za dobu $\tau = x/v$ (obr.3). O tuto dobu je kmitání bodu M opožděno vzhledem ke kmitání zdroje Z . Pro kmitání bodu M bude tedy platit vztah:

$$y = y_m \sin \omega(t - \tau) = y = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad \text{kde: } \tau = \frac{x}{v} \quad (1.4.1.1)$$

Vztah upravíme dosazením $\omega = 2\pi/T$ a $V_t = \lambda$ a dostaneme rovnici postupně vlny pro řadu bodů:

$$y = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1.4.1.2)$$

Rovnice platí jak pro příčné tak i pro podélné harmonické vlnění v homogenním prostředí. V daném prostředí mají tato vlnění různou rychlost. Všechny veličiny popisující vlnění jsou funkcí času, ale i funkcemi polohy (souřadnice) bodu, kterým vlnění prochází.

1.5 Stojaté vlnění^{19]}

Významný případ interference vlnění nastává, jestliže dvě vlnění o stejné amplitudě a frekvenci postupují pružným prostředím proti sobě. K tomu dochází zejména při šíření vlnění v omezeném prostoru. Vlnění postupuje až k okraji pružného prostředí, tam se odrazí a postupuje v opačném směru. Přímé a odražené vlnění se skládají a vzniká stojaté vlnění. Podle upevnění koncového bodu řady kmitajících bodů rozlišujeme:

Odras na pevném konci: nastává vlnění s opačnou fází, odražené vlnění má stejnou vlnovou délku jako původní vlnění, ale jeho fáze se změní o π .

Odras na volném konci: vlnění se stejnou fází, odražené vlnění má stejnou vlnovou délku i fázi jako vlnění původní.

1.6 Lom vlnění^[19]

V homogenním prostředí se šíří vlnění přímočaře. Na rozhraní dvou prostředí se vlnění zčásti odráží zpět a částečně prochází do druhého prostředí. Při přechodu z jednoho prostředí do druhého se mění směr šíření vlnění, vlnění se láme. Lom vlnění je závislý na změně směru, kterou se vlnění po průchodu rozhraním dvou prostředí šíří. V případě, že jsou vlnoplochy stejné s rozměry překážek, je lom doprovázen ohybem, tedy dochází jen k ohybu. Pro různé prostředí, které se stýkají v rovinném rozhraní platí, že mají rozdílné rychlosti v_1 a v_2 .

1.7 Ohyb vlnění^[19]

Ohyb vlnění spočívá v tom, že každý bod vlnoplochy, která dospěla k překážce, je zdrojem elementárního vlnění, které se šíří všemi směry, tedy i do prostoru za překážku. Tam nastává vzájemná interference a to vede k zvětšení, či zmenšení amplitudy výchylky výsledného vlnění v jednotlivých bodech, což se projevuje jako ohyb vlnění.

Ohyb vlnění souvisí s rozměry překážek, vlnovou délkou vlnění, které na překážku dopadá. Pro ohyb vlnění platí, že je při určitém rozměru překážky a poloze pozorovatele tím výraznější, čím větší je vlnová délka vlnění. Směr šíření vlnění je ovlivněn ohybem vlnění na překážkách. Tento vliv je však menší, čím menší je vlnová délka vlnění.

1.8 Chvění mechanických soustav^{[16][17]}

Vibrace vznikají kmitáním neboli oscilací mechanické soustavy, kdy jednotlivé hmotné body tělesa vykonávají vratný pohyb kolem rovnovážné polohy prostředí nebo pružného tělesa. Chvění je charakteristické pro zdroje zvuku jako struny, tenké tyče či lidské hlasivky. Zdroje zvuku tedy plní funkci oscilátoru, ze kterého se kmitání přenáší do okolního prostředí, nejčastěji do vzduchu a prostředím se šíří postupné podélné vlnění.

Vibrace se rozdělují do dvou hlavních skupin, které jsou popsány jako deterministické vibrace a náhodné vibrace. Deterministické vibrace jsou takové vibrace,

u kterých je hodnota vibrací v určitém čase přesně určena jejich časovou závislostí. U náhodných vibrací nelze určit hodnotu v přesně daném čase. Zvláštním úkazem vibrací jsou mechanické rázy, ty vznikají při náhlé změně síly, polohy či rychlosti. Dále se můžou vibrace dělit na vibrační signály harmonické a neharmonické. Harmonické vibrace se vyznačují periodickým signálem, který je dán harmonickou časovou funkcí výchylky vibrací. Neharmonické vibrace mohou mít jak periodický, tak i neperiodický signál. V praxi se nejčastěji můžeme setkat s náhodnými vibracemi, které nelze předpovědět na rozdíl od deterministických procesů. Základní rozdělení na náhodných vibrací je na stacionární a nestacionární. Stacionární vibrace jsou vibrace, jejichž vlastnosti se statisticky nemění po dlouhou dobu. Nestacionární náhodné vibrace jsou vibrace, které nesplňují podmínky kladené na stacionární vibrace.

2. Šíření zvuku^{[16][17][18][19]}

Ze zdroje se zvuk šíří jen pružným látkovým prostředím jakéhokoliv skupenství. Nejčastěji to je vzduchem a šíří se jako podélné postupné vlnění na rozdíl od kapalin a plynů v nichž vzniká jen vlnění podélné, v pevných látkách může vznikat také mechanické vlnění příčné. V látkách, které nejsou dostatečně pružné, se zvuk šíří velmi špatně. Nejdůležitější charakteristikou látek z hlediska šíření zvuku je rychlost zvuku v daném prostředí. Zvuk se šíří nejrychleji ve sklu či kovech, potom v kapalinách a nejpomaleji ve vzduchu.

Tab.1 rychlosti zvuku.

Látka	Rychlost zvuku [m·s ⁻¹]
vzduch	340
voda	1500
led	3200
ocel	5000
sklo	5200

Rychlost zvuku ve vzduchu závisí na složení vzduchu (nečistoty, vlhkost), ale nejvíce na jeho teplotě. Ve vzduchu o teplotě t má zvuk rychlost:

$$V_t = (331,82 + 0,61 (t)) \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$$

Tab. 2 závislost rychlosti zvuku na teplotě.

t [°C]	v [m·s ⁻¹]
0	331,82
5	334,87
10	337,92
15	340,97
20	344,02
25	347,07
30	350,12
35	353,17

Šíření zvuku je ovlivněno překážkami, na které zvukové vlnění dopadá, a projevuje se odraz i ohyb zvukového vlnění. Zvláštním případem odrazu zvuku od rozlehlé vzdálené překážky je ozvěna. Prodloužení doby trvání zvuku se nazývá dozvuk.

2.1 Zvuk ve volném prostoru^[18]

Zvuk v otevřeném prostoru je hůře slyšitelný nejen díky ohybu zvuku, ale také z důvodu poklesu intenzity zvuku se vzdáleností od zdroje. Při šíření zvuku ve volném prostoru se akustický výkon s rostoucí vzdáleností od zdroje rozprostírá na čím dál tím větší plochu. Díky tomu se snižuje intenzita. Od bodového zdroje se zvuk šíří ve vlnoplochách. Pokud se jedná pouze o rozptyl zvuku v prostoru, pak útlum se vzdáleností od zdroje je roven pro všechny kmitočty. U ostatních vlivů však útlum na kmitočtu závisí, proto se obvykle musí provést analýza posuzovaného zvuku. Při velké vzdálenosti šíření zvuku $r_1=100$ m a více, se navíc uplatňuje i útlum zvuku způsobený molekulární absorpcí či změnami teploty a prouděním vzduchu. Při těchto výpočtech se zpravidla uvažuje teplota 14 °C, kdy je rychlost šíření zvuku $v_0= 340$ m·s⁻¹.

2.2 Útlum zvuku ve vzduchu^[18]

Ztráta intenzity zvuku ve vzduchu neboli atmosférická absorpce závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu a na kmitočtu f (Hz). Vyjadřuje snížení hladiny akustického tlaku na jednotkovou vzdálenost od zdroje. Vítr nemá vliv na šíření zvuku, protože rychlost větru je řádově nižší než rychlost zvuku. Šíření zvuku může být ovlivněno změnou rychlosti větru v závislosti na výšce nad terénem. Ve vyšších vrstvách atmosféry se ve směru proti větru zvukové vlny ohýbají od zemského povrchu tak, že nízko nad

terénem vzniká akustický stín. Ve směru po větru se zvukové vlny ohýbají naopak k zemskému povrchu, což může mít za následek zesílení přenosu zvuku. Při záporném gradientu rychlosti zvuku je to naopak. Kolmo na směr větru se útlum ani zesílení přenosu zvuku neprojevují.

Zvyšující se teplotou roste i rychlost zvuku. Účinek gradientu teploty je podobný jako účinek gradientu větru. Při kladném účinku gradientu se zvukové vlny ohýbají směrem k zemskému povrchu, a dochází k zesílení přenosu. U záporného teplotního gradientu se vlny ohýbají od terénu a vytvářejí zvukový stín.

2.3 Útlum zvuku ohybem přes překážku^[18]

Jakákoliv překážka, která stojí v dráze šíření zvuku, jejíž rozměry převyšují vlnovou délku, vytváří zvukový stín, ve kterém dochází ke snižování intenzity zvuku oproti stavu volného šíření zvukových vln. Útlum intenzity závisí na poloze zdroje, na poloze a geometrickém tvaru překážky, na poloze pozorovatele za překážkou a na vlnové délce zvuku.

2.4 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru^[18]

V uzavřených prostorech dochází k odrazu akustické energie od stěn, stropu a podlahy zpět směrem ke zdroji. To má za následek zvyšování hladiny akustického tlaku v porovnání se stavem, který by vznikl ve volném prostoru. Významnou roli zde mají vlastnosti zvukové pohltivosti materiálů, které ohraničují uzavřený prostor.

3. Porózní materiály^{[3][12][17][30][31]}

Porózní materiály pohlcující zvuk absorbují většinu zvukové energie a odrážejí ji velmi málo. Existuje široká škála materiálů pro pohlcování zvuku, poskytující absorpční vlastnosti závislé na frekvenci, složení, tloušťce a povrchové úpravě. Nicméně pro vysoké hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti jsou nejvhodnější porózní materiály. Pórovitý absorbující materiál je pevná látka, která obsahuje dutiny, kanály či mezery tak, aby mohly být zvukové vlny pohlceny vně materiálu. Některé póry mohou být izolované

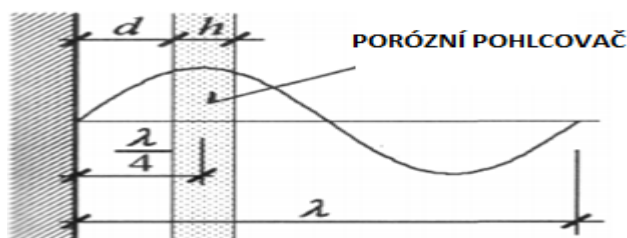
tj. uzavřené, což má vliv na některé makroskopické vlastnosti jako objemová hustota, mechanická pevnost a tepelná vodivost. V oblasti zvukové pohltivosti jsou uzavřené póry podstatně méně účinné než póry otevřené. Otevřené póry mohou být také tzv. slepé, kdy jsou otevřené pouze na jednom konci. Pro dobré zvukově pohltivé vlastnosti je tedy nutné, aby porózní materiál obsahoval co nejvíce otevřených pórů.

Pórovité absorpční materiály se skládají z nekonečných vláken, která mohou být přírodní či syntetická. Nejčastěji používaná přírodní vlákna jsou bavlna, konopí, len, vlna a minerální azbest. Syntetická vlákna mohou být například celulózová, skleněná, grafitová, či vyrobená z polymerních roztoků např. polyester, polypropylen, polyethylen, nebo kevlar. Syntetické vláknenné materiály vyrobené z minerálů a polymerů se používají především pro zvukovou a tepelnou izolaci. Ale protože jsou vyrobené z vysokoteplotního vytlačování a průmyslových procesů, založených na chemikáliích, jejich uhlíková stopa je značná. Proto je snaha v posledních letech používat přírodní vlákna pro výrobu zvukově absorbující materiál. Velkou výhodou přírodních vláken v podstatě zcela biologicky odbouratelné a jejich zpracování je ekonomičtější a šetrnější k životnímu prostředí. Nové moderní technologie zpracování umožňují využití vysoce kvalitních vláken za konkurenceschopné ceny pro průmyslové účely. Absorpční vlastnosti přírodních vláken jsou podobné jako u synteticky vyráběných vláken. Tyto vlastnosti lze upravit předběžnými úpravami jako je sušení, karbonizace, impregnace či mineralizace. A v neposlední řadě jsou přírodní vlákna bezpečnější pro lidské zdraví ve srovnání s většinou minerálních syntetických vláken.

3.1 Porózní pohlčovače^{[2][19][32][37]}

Tyto materiály, které mají vysokou pórovitost, jejichž základ tvoří vlákna nebo ztuhlá pěna. Póry musí být navzájem otevřené a dostatečně propojené a otevřené do volného prostoru. Minerály typu pěnových polystyrénů nejsou pro tyto účely vhodné pro uzavřenost jejich pórů. Póry se také nesmí uzavřít nevhodnou povrchovou úpravou například olejovým nátěrem. Na druhou stranu je možné ještě zlepšit vlastnosti důležité pro pohlcení akustické energie. Zlepšení dosáhneme tak, že je zakryt porózní pohlčovač tkaninou, sítí nebo deskovým materiálem s otvory (děrované desky, fólie) s procentem děrované plochy 25 % a více. Porózní pohlčovače mají největší účinnost, jsou-li přítomny ve vzdálenosti alespoň $\frac{1}{4}$ vlnové délky zvuku od tvrdého povrchu. Porózní pohlčovače pohlcují převážně ve vyšších kmitočtech, kde je vlnová délka malá. Pohlcující vlastnosti

porózních obkladů je možné regulovat jeho tloušťkou h nebo případně odsazením d desky pórovitého materiálu od obkládaného povrchu.



Obr. 4 porózní pohlcovač dle 30.

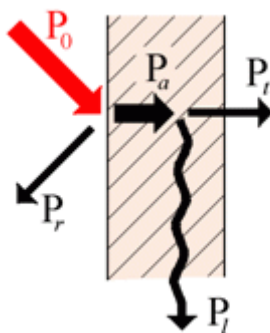
4. Zvuková pohltivost^[3]

Šíření zvukové vlny v určitém prostředí a její následný dopad na porózní materiál se část energie odrazí a zbytek energie se pohltí. Kromě toho část pohlcené akustické energie může projít do prostoru za překážkou. Porózní materiály jsou používány pro své vlastnosti snižovat amplitudu odražené zvukové vlny. Při pohlcení zvuku dochází k nevratné přeměně zvukové energie v energii jinou.

4.1 Činitel zvukové pohltivosti^{[2][3][19]}

Vlastnosti pohlcování zvuku se charakterizují hodnotou činitele zvukové pohltivosti α , který je popsán jako poměr energie pohlcené určitou plochou k energii, která na tuto plochu dopadá. Činitel pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se pohybuje v intervalu od 0 do 1. Překážka pohlcující zvuk úplně, hodnota činitele $\alpha = 1$, zatímco překážka odrážející zvuk má tento činitel roven $\alpha = 0$. Dalším faktorem pohltivosti je činitel zvukové odrazivosti, který je definován jako podíl odraženého akustického výkonu a dopadajícího výkonu. A v neposlední řadě také činitel prostupu zvuku, jež je definován jako podíl akustického výkonu procházející konstrukcí a dopadajícího akustického výkonu. ^[19]

Dopad zvuku o akustickém výkonu P_0 (W) na překážku se část výkonu P_R (W) odrazí a část P_a (W) pohltí. Pohlcený výkon se rozdělí na část výkonu P_t (W), která se ztratí a na část P_l (W), která projde skrz překážku a prochází do vedlejšího prostoru.



Obr. 5 dopad zvuku na překážku dle 19.

1) Činitel odrazu :

$$\rho = \frac{P_r}{P_0} \quad (4.1.1)$$

2) Činitel pohltivosti:

$$\alpha = \frac{P_a}{P_0} \quad (4.1.2)$$

3) Činitel prostupu (průzvučnosti):

$$\tau = \frac{P_t}{P_0} \quad (4.1.3)$$

4.2 Mechanika pohlcování zvuku^{[2][3][5][19][30][36]}

Přeměna akustické energie při jejím šíření v pevných látkách se může uskutečnit třemi různými způsoby: ^[19]

- Třením
- Poklesem akustického tlaku
- Nepružnou deformací těles

K transformaci akustické energie pomocí tření dochází při pohybu vzduchu v blízkosti stěny. Pro dostatečnou přeměnu akustické energie, by měla být třecí plocha co možná největší. Vhodné materiály pro pohlcování zvuku jsou pórovité látky, jejichž plocha je velká vůči danému objemu látky. Podmínkou pro dobrou pohltivost je, aby byly póry vzájemně propojeny a díky tomu se mohl zvuk šířit dále skrz materiál. Při šíření materiálem dochází ke snížení rychlostního gradientu a nevratné přeměně kinetické energie na energii tepelnou. U materiálů s poddajnou strukturou nemusí být póry propojeny, aby docházelo k akustické pohltivosti.

U druhé zmíněné metody může být více příčin poklesu akustického tlaku. Jednou z příčin je stlačení vzduchu, ke kterému dochází v místech zhuštění částic, v tomto důsledku se zvýší akustický tlak. Následkem tohoto přestupu poklesne teplota vzduchu a tím i tlak v uvažovaném místě. Další možností relaxace akustického tlaku při šíření zvukové vlny je změna průřezu pórovitého materiálu, kdy v místech menšího průřezu dojde k stoupnutí teploty. Má-li pevná látka vlastnosti dobrého vodiče tepla, dochází k vyrovnání teplot s okolím a tím i k relaxaci akustického tlaku. Dojde-li ke zmenšení neboli relaxaci akustického tlaku, zmenší se celková potenciální energie a tím se sníží i energie zvukové vlny.

Změny zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Při stlačení této látky dostatečnou silou, se látka nevrátí do jejího původního stavu ani po jejím odlehčení. Práce, která je vynaložená na deformaci je potom větší než práce získaná pružností tělesa při návratu do jeho původní polohy. Rozdíl představuje snížení akustické energie vlivem vnitřního tlumení zvuku v materiálu.

4.3 Akustické rezonanční membrány^{[18][19]}

Porózní materiál pohlcuje zvuk především v oblasti vyšších frekvencí. S tloušťkou těchto materiálů se nejvyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti posunují k nižším frekvencím.^[18] V případech, kdy je nutné tlumení zvuku o nižších frekvencích jsou tyto materiály opatřeny akustickými prvky založeny na principu rezonance. Rezonátor pohlcuje akustickou energii nižších frekvencí, což znamená, že od rezonančního kmitočtu směrem k nízkým i vysokým kmitočtům hodnoty činitele zvukové pohltivosti rychle klesají. Tyto úpravy nemají širokopásmový účinek. Porózní materiály jsou používány jako prvek, který slouží ke zmenšování amplitudy odražené zvukové vlny. Materiály založeny na rezonančních principech lze rozdělit do těchto skupin:

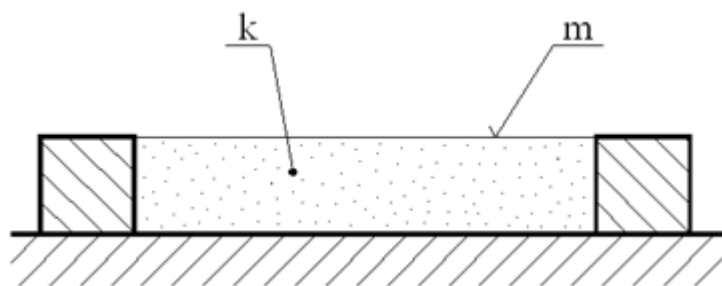
- Kmitající membrány a desky
- Helmholtzovy rezonátory

4.4 Kmitající membrány^{[17][19][30]}

Membránou je tenká deska či fólie s velmi malou ohybovou tuhostí. Je upevněna na rámu v určité vzdálenosti od stěny.^[19] Mezi membránou o hmotnosti m a dalším tělesem je vzduchový polštář, který vytváří pružinu o tuhosti k . Materiál membrány má ve srovnání se vzduchovým polštářem nižší tuhost. Rezananční kmitočet soustavy f_r , při kterém dojde k maximálnímu pohlcení akustické energie je dán vztahem:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,4p_b}{m''d}} \quad (4.4.1)$$

kde p_b (Pa) - barometrický tlak vzduchu, m'' (m^2) - plošná hmotnost, d (mm) - tloušťka vzduchového polštáře.



Obr. 6 porózní materiál s membránou dle 19.

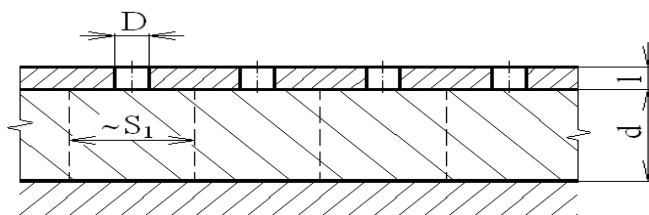
Pro pohlcování akustické energie má velký vliv médium, které vyplňuje prostor mezi membránou a materiálem. Tento prostor musí být vyplněn pouze vzduchem či pohltivým materiálem. Jejich maximální zvuková pohltivost je dosažena při rezonanční frekvenci f_r . Jeli v prostoru pouze vzduch dochází k pohlcování akustické energie jen v úzkém frekvenčním pásmu. V případě, že je prostor vyplněn pohltivým materiálem je nižší zvuková pohltivost při rezonanční frekvenci ve srovnání se samotným vzduchem. Dochází zde k významnému pohlcování akustické energie v širším frekvenčním pásmu. Pro pohlcování úzkého pásma frekvence okolo frekvenčního pásma je vhodné použít kmitající membránu se vzduchovým prostorem. V dalších případech je výhodnější použít do prostoru mezi membránu a stěnu pohltivý materiál. Lze také použít kmitající desky, které mají podstatně vyšší tuhost v ohybu ve srovnání se vzduchovým polštářem mezi deskou a stěnou. Maximální zvukové pohltivosti je dosaženo při nízkých frekvencích. Dále se u desek uplatňují kromě základních kmitů i kmity vyšších řádů.

4.5 Helmholtzovy rezonátory^{[3][12][19]}

Helmholtzovy rezonátory se používají výhradně pro pohlcování zvuku v oblasti velmi nízkých frekvencí.^[12] A to v případech, kdy nelze použít kmitající membrány či desky. Používají se buď samostatně, nebo jsou sdruženy do děrovaných panelů. Rezonátory se skládají z dutiny o objemu V a hrdlem o průměru D . Pohybu akustické vlny je kladen odpor třením. V praxi se nejčastěji používají děrované panely, které jsou tuhé a mají kruhové či kuželové otvory. Deska o tloušťce l je umístěna ve vzdálenosti d od pevné stěny. Každému otvoru patří příslušná dutina, která společně s otvorem tvoří Helmholtzův rezonátor. Rezananční frekvence f_r , při které dochází k maximálnímu pohlcování akustické energie je dána vztahem:

$$f_r = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi D^2}{d l S_1}} \quad (4.5.1)$$

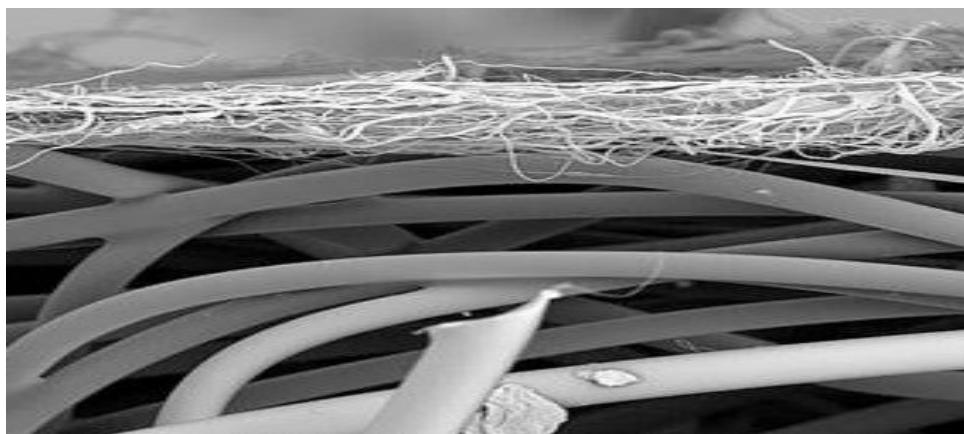
kde d (mm) je tloušťka vzduchového polštáře l (mm) - tloušťka desky, S_1 (mm²) - plocha stěny připadající na jeden rezonátor, D (mm) – průměr hrdla.



Obr. 7 konstrukce děrovaného panelu dle 19.

4.6 Rezonanční efekt nanovláknenné vrstvy^{[24][33][34][35][39]}

Rezonanční membrány tohoto typu jsou vyrobeny pomocí elektrostatického zvlákňování vodného roztoku polymeru, které jsou schopny plnit funkci rezonující membrány. ^[33] Mají výborné akustické vlastnosti nanovláknenných vrstev jsou dány velkým specifickým povrchem nanovláken. U tohoto materiálu může docházet k rezonanci na vlastní frekvenci a také k viskózním ztrátám. Při dopadu zvukového vlnění na membránu tohoto typu jsou tyto membrány uvedeny do nucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Porózní materiál zajišťuje dostatečný útlum rezonující membrány, aby co největší množství zvukové energie nashromážděné v rezonátoru bylo přeměněno v energii tepelnou. Struktura těchto materiálů se od netkaných textilií vyrobených běžnými způsoby liší hlavně průměrem vláken a tomu odpovídajícími mezi vláknennými prostory. Tyto vlastnosti jsou velkou výhodou oproti stávajícím materiálům.



Obr. 8 nanovláknenná membrána dle 24.

5.1 Charakteristiky zvukově pohltivých porózních materiálů^{[3][34][36]}

5.1 Tloušťka

Tloušťka vláknitých materiálů, zásadně ovlivňuje činitele zvukové pohltivosti, čím tlustší materiál, tím je činitel zvukové pohltivosti vyšší pro oblast nižších frekvencí.^[3] S tím jak roste vzdálenost od stěny akustická rychlost stoupá a v kmitně vzdálené o čtvrtinu vlnové délky od pevné stěny dosáhne maxima. Tloušťkou porózního materiálu se zvýší jeho poddajnost. Jeli mezi porózní vrstvou a pevnou stěnou vzduchová mezera je výsledek obdobný. Tyto účinky vzduchové polštáře se projevují tehdy, je-li porózní vrstva upevněna v určité vzdálenosti od stěny tak, aby nemohla kmitat. Absorpční maximální hodnoty se s rostoucí tloušťkou posunují k nižším frekvencím.

5.2. Průměr vláken

Průměr jednotlivých vláken je jedním z faktorů, které mají vliv na šíření akustické vlny.^[3] Propustnost materiálů je při konstantním zaplnění funkcí průměru vláken. Měrný akustický odpor je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vláken. Při dvojnásobném zvětšení průměru vláken se měrný akustický odpor zmenší šestnáctkrát.

5.3 Zaplnění

Zaplnění roste s objemovou hmotností vlákenného materiálu.^[3] Při dosažení mezního stavu, kdy je zaplnění moc velké, se zvuk nešíří póry, ale je odražen.

5.4 Anizotropie

Pro šíření zvuku ve směru kolmém na směr uspořádaných vláken ve vlákenném materiálu činitel zvukové pohltivosti vykazuje rezonanční efekt.^[3] V případě šíření zvukové vlny paralelně s vlákenným uspořádáním rezonance nevznikají.

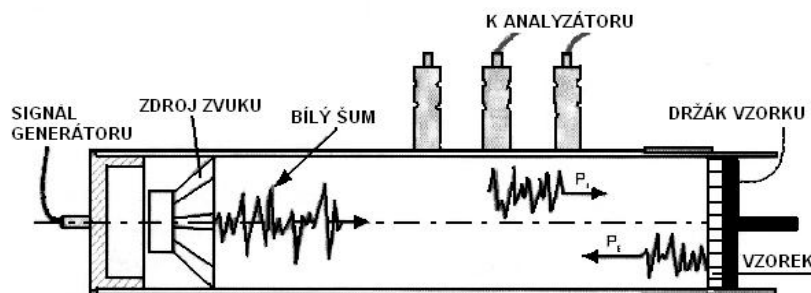
5.5 Hustota polymeru

Hustota polymeru má velmi malý vliv na činitel zvukové pohltivosti vlákenného materiálu. Optimální hodnota hustoty polymeru je $1650\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.^[3]

6. Metody měření zvukové pohltivosti^{[3][29][30]}

6.1 Dvou mikrofónová impedanční trubice

Metoda měření akustické pohltivosti pomocí impedanční trubice, dokáže určit, jak dobře nebo naopak špatně libovolný materiál pohlcuje zvuk.^[3] Sestava pro měření se skládá z impedanční trubice opatřené výstupy pro mikrofony, generátor zvuku, zesilovač, analyzátozem zvukového signálu a výpočetní techniky. Princip měření je jednoduchý a řeší potřebu přesného určení pohltivosti, které bylo do objevení této metody zdouhavé a nákladné. Měřicí zařízení se skládá z dvou trubic. Trubice mají různé vnitřní průměry a to 100mm a 29mm. Na vzorcích o průměru 100 mm jsou měřeny nižší frekvence (50 Hz- 1,6 kHz) a na větších o průměru 100 mm měří vyšší frekvence (500Hz – 6,4 kHz). Mezi výhody této metody měření patří rychlost a potřeba malých vzorků. Nevýhodou je, že měření probíhá pouze pro kolmý dopad zvuku.



Obr. 9 řez impedanční trubicí dle 29.

Princip měření pomocí dvou mikrofonových impedančních trubic je založen na dopadu zvuku na vzorek, který je vysílán ze zdroje na opačném konci trubice. Mikrofony, které jsou umístěny na stěně trubice snímají intenzitu dopadajícího P_i a odraženého P_e akustického tlaku, pomocí těchto složek jsou vypočteny tři frekvenční přenosové funkce: H_i – frekvenční přenosová funkce H_i – frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou, H_e – frekvenční dopadající složka související s odraženou složkou. Pomocí těchto hodnot lze určit celkového činitele zvukové odrazivosti:

$$R_0 = \left(\frac{H_i - H_e}{H_e - H_i} \right) e^{j2k(l+s)} \quad (6.1.1)$$

kde $k = \frac{\omega}{c}$ (vlnové číslo), l značí vzdálenost mezi prvním mikrofonem a zkoušeným vzorkem, s je vzdálenost mezi dvěma mikrofony. Výsledný činitel zvukové pohltivosti lze vypočítat takto:

$$\alpha = 1 - |R_0|^2 \quad (6.1.2)$$

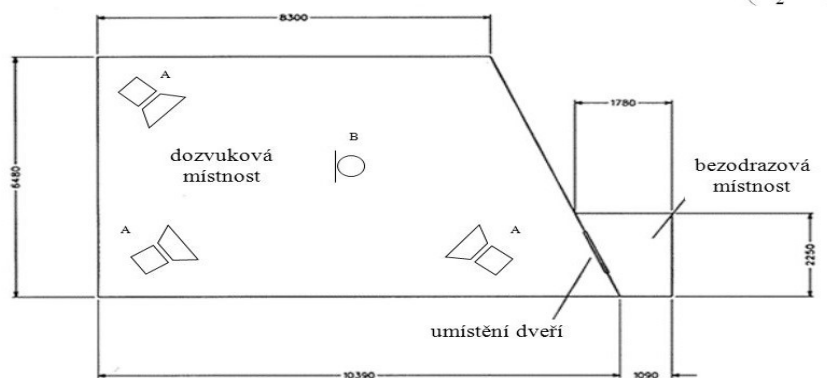
6.2 Dozvuková místnost

Tato metoda má hlavní výhodou v tom, že zajišťuje všesměrový dopad zvukového vlnění.^[3] Měření je založeno na měření doby dozvuku v prázdné dozvukové místnosti T_1 o objemu V a v měření doby dozvuku s vloženým měřeným vzorkem T_2 o

ploše S . Činitel zvukové pohltivosti α je vypočítán z naměřených dob dozvuku dle vztahu:

$$\alpha = \frac{0,16V}{S} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (6.2.1)$$

Nevýhodou metody je potřeba velkých místností, které musí splňovat náročná kritéria, co se týče rozměrů a nerovnoběžných stěn, které by měli být odrazivé s nulovou pohltivostí. V neposlední řadě je také potřeba velkých rozměrů měřených vzorků.



Obr. 10 schéma dozvukové místnosti dle 30.

6.3 Metoda odražené vlny

Díky této metodě určujeme činitele zvukové pohltivosti pro různé úhly dopadu zvukové energie φ (α).^[3] Pomocí signálu, který je vysílán z reproduktoru do vzdáleného mikrofonu je změřena hladina akustického tlaku $L_{p,d}$ (dB). Mikrofon a reproduktor musí být nastaveny tak, aby směřovaly na vzorek pod stejným úhlem a délka dopadající odražené složky zvuku byla shodná se vzdáleností mikrofonu a reproduktoru. Poté je změřena hladina akustického tlaku $L_{p,r}$ (dB). Z těchto naměřených hodnot je vypočítán činitel zvukové pohltivosti dle:

$$\alpha_{\varphi,f} = 1 - 10^{\frac{-(L_{p,d} - L_{p,r})}{10}} \quad (6.3.1)$$

Mezi výhody této metody patří možnost použití malých vzorků či všesměrový dopad zvuku. Nevýhodou je, že je potřeba dokonale odrazivé podložky s nulovou zvukovou pohltivostí a nutnost použití směrového mikrofonu a reproduktoru.

7.Netkané textilie

Definice netkaných textilií se neustále mění, vznikají stále nové technologie a s tím i další možnosti výroby. Současná definice je následovná: Netkaná textilie je vrstva vyrobená z jednosměrně nebo náhodně orientovaných vláken, spojených třením, nebo kohezí či adhezí s výjimkou papíru a výrobků vyrobených tkaním, pletením, všíváním, prolétáním nebo plstěním.

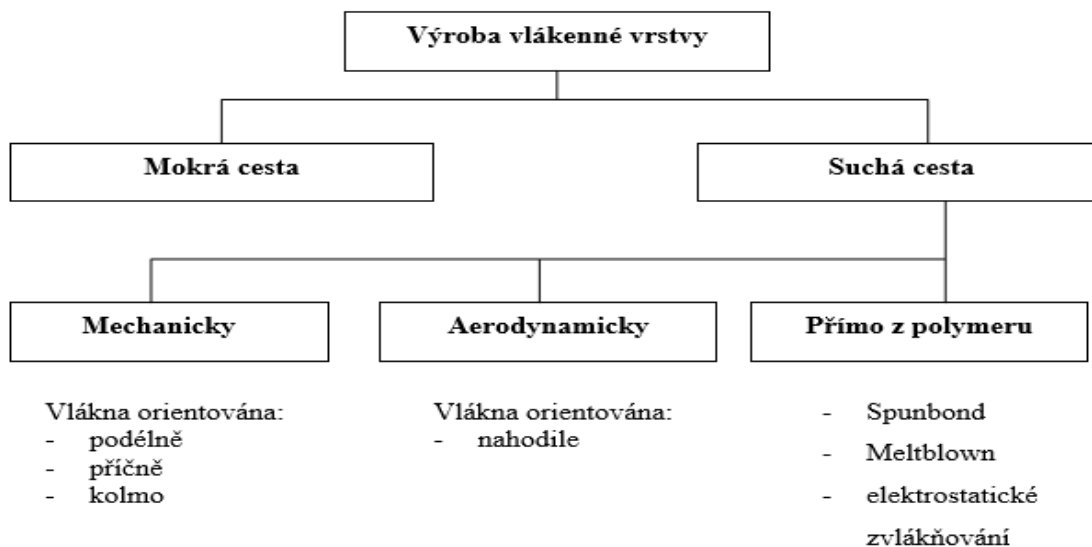
V této práci se nebudeme věnovat problematice netkaných textilií do podrobností. Podrobněji budou popsány pouze technologie, které souvisejí s výrobou vzorků, na kterých byla měřena zvuková pohltivost, v praktické části této práce.

7.1 Technologie netkaných textilií^[32]

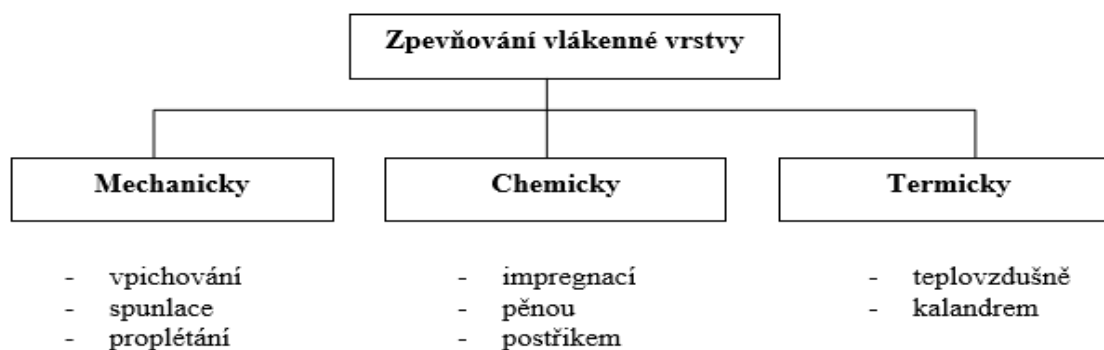
Obecný postup výroby netkaných textilií lze rozčlenit podle následujícího schématu:

- a) příprava vláknenných surovin
- b) výrobní technologie
 - příprava vláknenné vrstvy
 - zpevnění vláknenné vrstvy
 - ořezávání okrajů, řezání, navíjení
- c) úprava, případně vrstvení, povrstvování

Schéma může být při každé výrobě odlišné, některé operace mohou být vynechány.



Obr. 11 rozdělení netkaných textilií podle technologie výroby dle 32.



Obr. 12 schéma zpevňování vláknenné vrstvy dle 32.

-Mechanické způsoby přípravy vláken - tento způsob spočívá ve vytvoření vláknenné pavučiny a v jejím následném vrstvení. Pro přípravu pavučiny se používají mykací stroje. Základem mykacího stroje je soustava válců, které jsou opatřeny různými povlaky s ostrými hroty. Pomocí povlaků se vlákna rozvolňují a urovnávají do stejného směru.

-Aerodynamická výroba vláknenné vrstvy - tímto způsobem je rovno připraveno rozvolněním vláknenné suroviny rychle se otáčejícím šhubacím válcem. Z toho válce se vlákna snímají pomocí odstředivé síly a přiváděného proudu vzduchu. Získané rouno se následně zpevňuje.

-Příprava vláknenných vrstev z taveniny polymeru

- **spun-bond** - k tvorbě vláknenné vrstvy dochází extruzí roztaveného polymeru skrz trisku a následné odtažení polymeru, který je ochlazován pomocí rychle proudícího vzduchu.

- **melt-blown** - po zahřátí a extruzi polymeru pomocí dávkovací hubice je vznikající vlákno polymeru strháváno a spřádáno horkým vzduchem. Vláknenná vrstva je formována na porózním sběrném bubnu.

- **elektrostatické zvlákňování** - tento výrobní proces je založen na formování taveniny či roztoku polymeru působením elektrostatického pole.

-Hydrodynamická výroba vláknenné vrstvy - je označována také jako mokrá cesta. Princip vznikl odvozením od výroby papíru. Je založena na tvorbě vláknenné vrstvy na sítu pomocí filtrace suspenze.

7.2 Výroba netkaných textilních desek carNETEX

Postup výroby začíná u výrobního příkazu pro linku Mattformer, pomocí které byly tyto desky vyrobeny.

Tab.3 výrobní příkaz desek carNETEX.

název výrobku	materiálové složení	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)	šířka (mm)	délka (mm)
carNETEX	75% bavlna 25% bikomponentí vlákno	600	10+/-1,5	1300	1300

V případě modifikace vzorku je do výrobního příkazu zanesena daná úprava a způsob jak a kde bude aplikována. Při výrobě desek carNETEX je aplikace úpravy provedena po technologii air laid. Před následným zpevněním vláknenné vrstvy jsou umístěny sypače, pomocí kterých se aplikuje termoplastický prášek na povrch vláken a poté jsou na vrchní stranu desky aplikovány dané materiály pro výsledné zlepšení

některých fyzikálních či mechanických vlastností konečných výrobků. V případě desek carNETEX se používá perforovaná fólie, perforovaný papír či vlies.

Po zadání příkazu pro výrobu desek je materiál ve správném poměru navážen a zbaven nečistot pomocí nakládacích boxů. Dále se materiál dopravuje po posuvném pásu k potrubí ve kterém je materiál dopraven pomocí vzduchu do mísícího boxu. V mísícím boxu se chomáče vláken rozfoukají a vytvoří homogenní směs, která dále pokračuje ve výrobním procesu. Dalším procesem připravených vlákenných chomáčů je tvorba souvislé vrstvy pomocí aerodynamické výroby vrstvy.

7.2.1 Aerodynamická výroba netkaných textilií^[32]

Tímto způsobem výroby je vlákenná surovina rozvolněna pomocí rychle se otáčejícího šhubacího válce. Válec je opatřen speciálním pracovním povlakem, který umožňuje rozvolnění vláken. Poté jsou vlákna snímána z válce účinkem odstředivé síly a přiváděného proudu vzduchu. Proud vzduchu unáší a ukládá vlákna na pohybující se dopravník, který vede vlákennou vrstvu k dalším technologickým úpravám.

U této výroby je charakteristické postupné ukládání vláken, kdy dochází k nahodilé orientaci vláken. Z tohoto důvodu nedochází k nijak zvlášť velkým rozdílům vlastností vznikajícího rohu v jednotlivých směrech. Díky této metodě se při výrobě objemnějších vrstev vlákna ukládají šikmo a tvoří tak vrstevnatou či šupinatou strukturu. Velkou výhodou aerodynamické výroby je izotropický charakter výrobku a tedy již zmíněné malé rozdíly ve vlastnostech v příčném a podélném směru. Další kladnou vlastností je velký rozsah plošných hmotností a možnost výroby objemných vrstev. Slabou stránkou této technologie je poměrně nízký stupeň ojednocení vláken šhubacím válcem nebo jejich zaplétání v proudě vzduchu. Nevýhody negativně ovlivňují výsledný výkon zařízení pro lepší ojednocení vláken lze zlepšit nižším dávkováním suroviny. Vlákna, která se zaplétají vedou ke vzniku nerovnoměrného rozložení vlákenné hmoty ve výrobníku. Tomuto jevu můžeme předejít snížením poměru vzduch/vlákna, ale tímto krokem se opět sníží výsledné zatížení stroje. Jako ideální poměr vzduch /vlákno můžeme považovat 0,0003 – 0,02 g vláken na 1 m³ vzduchu. Nejvyšší koncentrace vláken je ovlivněna jejich délkou a jemností.

Po tomto technologickém postupu výroby pokračuje materiál dále ve výrobním postupu a to ke zpevnění. Při výrobě netkaných textilních desek carNETEX se používá

technologie termického pojení. Nejdříve je vlákenný materiál vystaven teplu v peci, kdy dochází za vyšších teplot k pojení díky pojivým složkám a dále k zvýšení pevnosti a redukci tloušťky pomocí kalandrů.

7.2.2 Termické pojení^{[32][39]}

Způsoby zpevňování vlákných vrstev termickými způsoby můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin a to termické pojení teplým vzduchem a na pojení kalandry. Princip způsobu tohoto druhu pojení je, že díky vysokým teplotám roztavíme pojící složky, které mají nižší teplotu tání než základní vlákna. Poté se materiál zchladí a pokračuje dále ve výrobním procesu. Pro výrobu carNETEX desek bylo využito obou technologií.

7.2.2.1 Teplovzdušné pojení^{[32][39]}

Při tomto způsobu pojení se používají nejčastěji směšové vlákné vrstvy, které jsou tvořeny základními vlákny a tzv. pojivými vlákny. Dalšími používanými metodami je pojení pomocí folií či mřížek z termoplastických polymerů, které jsou vloženy mezi základní vlákna. Důležitou podmínkou pro správné fungování této metody je nezbytné, aby pojený materiál propouštěl teplý vzduch, a proto se například fólie musí nejdříve perforovat. Jako další možný způsob pro teplovzdušné pojení se používá nanesení pojiva na pavučinu či vláknou vrstvu.

Pro teplovzdušné pojení, jak vyplývá z výše uvedeného, můžeme použít polymery v různých formách.

Jednou z možností aplikací pojivých polymerů jsou prášky. Připravují se mechanickým drcením granulátu pod teplotou zesklnění daného polymeru. Velikost zrn používaných prášků se pohybuje v rozmezí 0,1-0,5mm. Nevýhodou prášků jsou různé distribuce velikosti částic. Jako pojiva se nejčastěji používají homopolymery k jejichž tání dochází za nižších teplot (polyamid, polypropylen). Dále se používají různé kopolymery (kopolyestery, kopolyamidy), s teplotami tání od 110°C až po 260°C. Na tom jaký polymer se použije mají vliv výsledné požadavky na chemickou a tepelnou odolnost výrobku a také závisí na výsledné míře zpevnění.

Dalším způsobem aplikace termoplastický polymerů pro termické zpevnění mohou být níže tající monokomponentní nebo bikomponentní vlákna. Pro správné využití vláken při teplovzdušném pojení platí tyto podmínky:

- a) Musí být voleny taková pojivá vlákna, která mají teplotu tání menší než je teplotní odolnost základních vláken.
- b) Vlákna musí být odolná proti tepelné a tepelně oxidační degradaci při vysokých teplotách.
- c) Musí mít nízkou srážlivost za tepla.
- d) Nízká viskozita taveniny. Proto se volí polymery s nižšími molekulovými hmotnostmi a vyššími indexy toku.
- e) Dobrou adhezi k základním vláknům.
- f) Nízký obsah a vhodný typ povrchové preparace. Preparace snižuje výslednou adhezi a má negativní vliv na ovzduší.

Po přípravě vlákenné vrstvy dochází k samotnému procesu pojení, který se skládá ze tří odlišných operací a to:

1. Tavení pojiva – zvýšením teploty nad teplotu tání pojiva.
2. Formování pojivých míst – utváření pojivých míst, ve kterých došlo ke spojení materiálu.
3. Zpevnění pojiva – ochlazením pojené textilie

Vlákenná vrstva s naneseným pojivem prochází horkovzdušnou komorou s cirkulujícím horkým vzduchem. Tento vzduch má vysoké teploty a je udržován ohřevným a regulačním systémem tak, aby došlo k roztavení pojiva. Teplo je proháněné díky vestavěným ventilátorům a díky tomu dochází k velmi rychlému transportu tepla k povrchu vláken. Čas, který je potřebný k potřebnému ohřevu materiálu je okolo 10 s, taková rychlost je velkou výhodou tohoto procesu pojení. Pro tento typ pojení je

charakteristické použití velkých pecí, kde je pojený materiál uložen na horizontálních síťových páslech.

Po ohřátí pojivých složek vznikají různé tvary spojů, které ovlivňují výsledné vlastnosti pojeného materiálu. Posledním krokem této technologie je následné ochlazení vláknenné vrstvy, díky němuž se dosáhne konečného zpevnění materiálu

7.2.2.2 Pojení kalandrem^{[32][39]}

Pojení kalandrem je proces, kdy vláknenný materiál obsahující termoplastické komponenty (vlákna,prášek) prochází mezi dvěma válci. Válce jsou vyhřívány a mají různé pracovní povrchy. Vyhřev válců je zajištěn elektricky, vodou, plynem či olejem. Není pravidlem, že se musí ohřívat oba válce. Mezi válci dojde ke stlačení vrstvy a k jejímu ohřátí na takovou teplotu, kdy pojivé složky tají nebo jsou ve vizkoelastickém stavu. Tlak působí na pojivo a je jím formováno do tvaru pojících míst. Poté dochází k ochlazování textilie díky kterému se materiál zpevnění. Kalandry mohou být měkké mající povrch z lisované bavlny, juty, papíru a také tvrdé, které mají povrchy ocelové či litinové. Pro výrobu netkaných textilií se používají nejčastěji dvouválcové systémy s ocelovými jádry o průměrech 150-300 mm.

Válce mohou být hladké nebo rastrované. Hladké válce se používají na propojení vláknenné vrstvy v celé ploše natož rastrované jen v pojících místech volitelných rozměrů. Výrobní rychlost je omezena plochou styku vláknenné vrstvy s válci a tloušťkou materiálu.

Nejčastějšími pojivy používanými při kalandrování jsou polymery ve formě prášků nanesené na vrstvu. Hodně se také používají pojivá vlákna přimíchaná k základním vláknům. Další způsob je přidání fólie či mřížky mezi dvě vrstvy základních vláken.

Základními parametry pojení kalandrem jsou:

- typ a koncentrace pojiva
- teplota
- tlak
- rychlost postupu vláknenné vrstvy
- plošná hmotnost vláknenné vrstvy

Konečné výrobky mají charakteristicky nízkou objemnost a vysokou smykovou tuhost. Při výrobě rastrovaných povrchů kalandrů dochází k zlepšení ohebnosti, prodyšnosti, pevnosti a v neposlední řadě omaku.

Tento způsob termického pojení je u výroby desek carNETEX využíván pro dodatečné zpevnění vlákenného materiálu, ale hlavně pro redukci tloušťky. Následuje po operaci teplovzdušného pojení.

Jako poslední krok u výroby netkaných desek carNETEX je zařazena operace sekání, pomocí nožů v příčném směru výroby desek. Touto operací je zajištěno požadovaných rozměrů desek.

II PRAKTICKÁ ČÁST

8. Příprava vzorků

V druhé části této práce bylo vyrobeno a následně měřeno a vyhodnocováno 9 různých vzorků netkaných desek, jejichž název je carNETEX. Vzorky byly vyrobeny z druhotných textilních materiálů a následně upraveny podle výrobních možností Juta a.s. závod 08, kde byly vzorky také vyrobeny. Výroba zkoušených vzorků byla popsána v teoretické části této práce.

Tab.4 název a číslo měřených vzorků.

číslo vzorku	název vzorku + úprava vzorku
1	carNETEX + per. papír + flies
2	carNETEX +per. fólie + flies
3	carNETEX + flies
4	carNETEX + per. papír
5	carNETEX + per. fólie
6	carNETEX
7	carNETEX + nano nosič
8	carNETEX + nano nosič + nano vrstva 0,23 g
9	carNETEX + nano vrstva + nano vrstva 2,8 g

Tab. 5 technické specifikace materiálů použitých pro úpravu vzorků.

druh úpravy	materiál úpravy	plošná hmotnost (g/m ²)	tvar perforace	velikost průměru (mm)	rozteč (mm)
perforovaná fólie	LDPE	20	KRUHOVÝ	0,1	4
perforovaný papír	CELULÓZA	32	KRUHOVÝ	0,1	0,5
flies	PES, VISCÓZA	50	-	-	-
nano nosič	PE	5	-	-	-
nano vrstva	PE	5 + 0,23	-	-	-
nano vrstva	PE	5 + 2,8	-	-	-

Z celkových 9 různě upravených vzorků, jich bylo 6 včetně úpravy vyrobeno pomocí výrobní linky Mattformer, která se nachází v závodě 08 Juta Turnov. Další 3 úpravy těchto vzorků byly zhotoveny v laboratorních prostorách Technické univerzity v Liberci. Výroba a použité technologie výroby, byly popsány v teoretické části této práce (kapitola 7).

Úpravy vzorků 7, 8 a 9 byly provedeny pomocí laminace v laboratoři technické univerzity v Liberci. Každý vzorek byl laminován ve velikosti a4 a to dvakrát. Pro všechny

vzorky byla nastavena vzdálenost mezi laminovacími deskami 8 mm. Vzorek 7 byl laminován při těchto podmínkách: 120 °C po dobu 10 s. Vzorek číslo 8 a 9 byly laminovány při těchto podmínkách: 120 °C po dobu 30 s.

Po výrobě a úpravách byly všechny vzorky vyseknuty pomocí nožových raznic na vysekávacím stroji v laboratoři Technické univerzity v Liberci, a takto bylo připraveno 10 vzorků od každé úpravy, a to o průměru 100 mm a 29 mm. Poté byly malé a velké vzorky zváženy a ze součtu těchto hmotností byla vypočítaná plošná hmotnost vzorku včetně úpravy. Jako další krok byla měřena tloušťka každého vzorku na plošném tloušťkoměru za stálého tlaku 20 Pa.

8.1 Měření činitele zvukové pohltivosti

Měření zvukové pohltivosti bylo provedeno na dvoumikrofonové impedanční trubici. Podle návodu obsluhy stroje bylo měřeno na jednotlivých vzorcích činitel zvukové pohltivosti α . Měření probíhalo při teplotě $t = 21,5$ °C.

8.2 Návod obsluhy dvoumikrofonové impedanční trubice

V prvním kroku se zapne AUBION x.8 a generátor zvuku, na ploše počítače se spustí program Aubion x.8 a SysTune.

Druhým krokem je kalibrace mikrofónů v programu je nutné vybrat kanál 1 a na mikrofón A nasadit kalibrátor s nastavcem pro $\frac{1}{4}$ palcové mikrofóny a zapnout. Pro kanál na, kterém je připojen zapnutý kalibrátor se musí v programu přepnout do zobrazení Spectrum, kde musí být vidět výrazné maximum na frekvenci 1000 Hz. Poté se klikne na tlačítko Start calibration measurement, musí se, počkat až se hodnota ustálí a poté kliknout na tlačítko Stop calibration measurement. Dále se do políčka RMS pressuer db SPL zadá hodnota 94 a klikne se na apply a potvrdí. Toto se opakuje pro všechny mikrofóny/kanály.

Třetím krokem je samotné měření. Vzorek se vloží do držáku a poté k trubici. Mikrofóny se vloží do příslušných průchodek, do ostatních průchodek se musí vložit makety mikrofónů a vše zajistit. Klikne se na Play signal a nastaví se referenční a aktivní kanál. Zobrazení se nastaví na Mag v horní části, Phs ve spodní části. Po ustálení křivek se klikne na tlačítko Capture measurement. Takto se změří přenosová funkce H12. Poté

se prohodí pozice jednotlivých mikrofonů a přepne se referenční a aktivní kanál. Po ustálení křivek se opět klikne na tlačítko Capture measurement a pojmenuje se nově naměřená přenosová funkce H21. Takto se změří všechny malé a velké vzorky pro různé úpravy základních desek carNETEX.

Čtvrtým krokem je uložení a export dat. Pro možné vyhodnocení naměřených hodnot je nutné změnit typ souboru na koncovku etx. Další krokem je vyhodnocení měření pomocí tabulky vytvořené v Excelu.

8.3 Vyhodnocení činitele zvukové pohltivosti měřených vzorků

Vyhodnocení naměřených dat a zpracování grafů bylo provedeno pomocí programu Microsoft Excel.

Každý z 9 jinak upravených vzorků byl měřen 10 a poté byl vyhodnocen průměrný činitel zvukové pohltivosti a jeho směrodatné odchylky.

Pro vyhodnocení akustických vlastností měřených materiálů byla uvažována frekvenční oblast 100 - 6400 Hz. Naměřené hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci jednotlivých úprav materiálu a také závislost koeficientu zvukové pohltivosti při dané frekvenci jsou uvedeny v následujících grafech (1 - 19) a tabulkách (6 - 14). Pro každý vzorek je uvedena tabulka zvážených vzorků a jejich tloušťky, průměrný graf činitele zvukové pohltivosti a také ukázka závislosti činitele zvukové pohltivosti na plošné hmotnosti měřeného vzorku při frekvenci 5000 Hz. Srovnání naměřených hodnot různě upravených vzorků jsou uvedeny v Tab.15 a Graf 19.

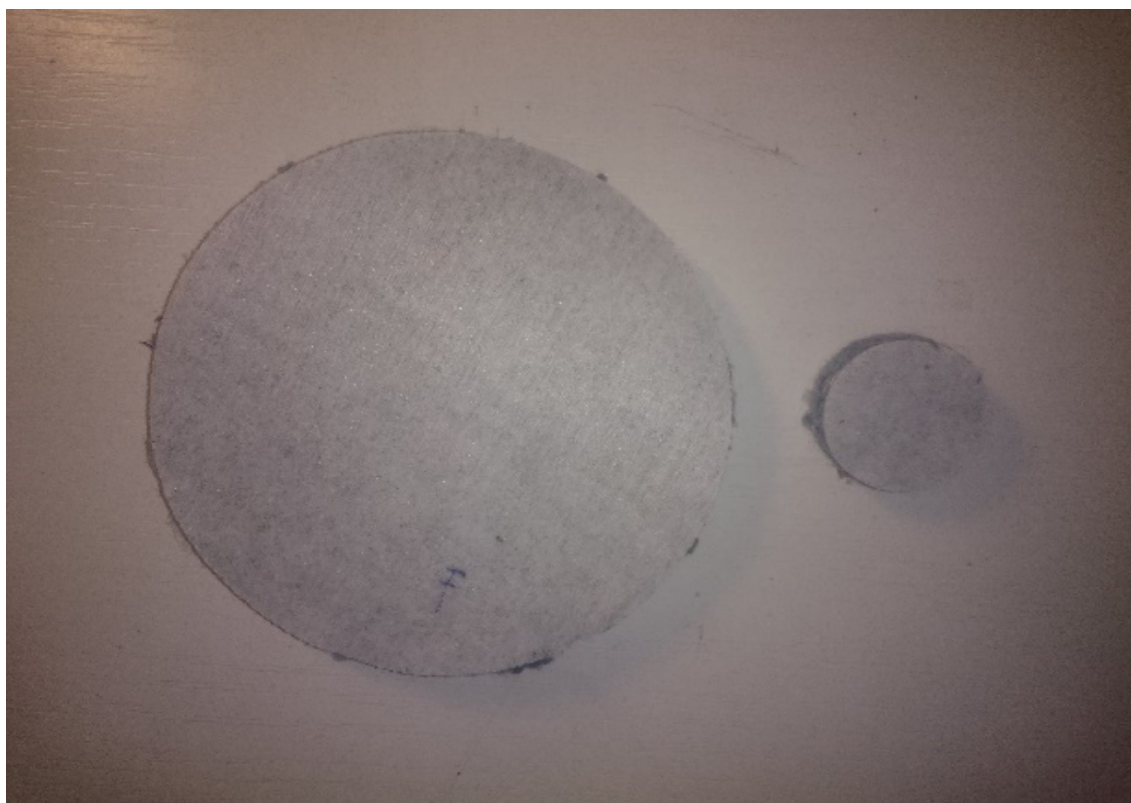
Výsledky jednotlivých vzorků neodpovídají předpokladům, kdy upravené vzorky mají horší výsledky než vzorky s různými úpravami. To je zapříčiněno hned několika parametry, které úzce souvisejí se schopností pohlcování zvuku. Jedná se tedy hlavně o tloušťku materiálu, tloušťku či odsazení membrány od obkládaného povrchu (Obr. 7), objemové hmotnosti a o materiál, ze kterého jsou desky vyrobené. Vlákněné desky jsou vyrobeny převážně z druhotného materiálu, kde není zajištěna 100 % konzistence a jednotná velikost natrhaných vláken. Tato nehomogenita má záporný vliv na reprodukovatelnost výsledků zvukové pohltivosti, která roste s klesajícím průměrem vlákna.

Zhodnocení výsledků, které jsou graficky a výpočetně zpracovány v kapitole 8.5 poukazuje na malé rozdíly zvukové pohltivosti u jednotlivých vzorků. Z grafů lze také vidět, že rozplyl mezi jednotlivými měřeními stejného materiálu je větší než rozptyl

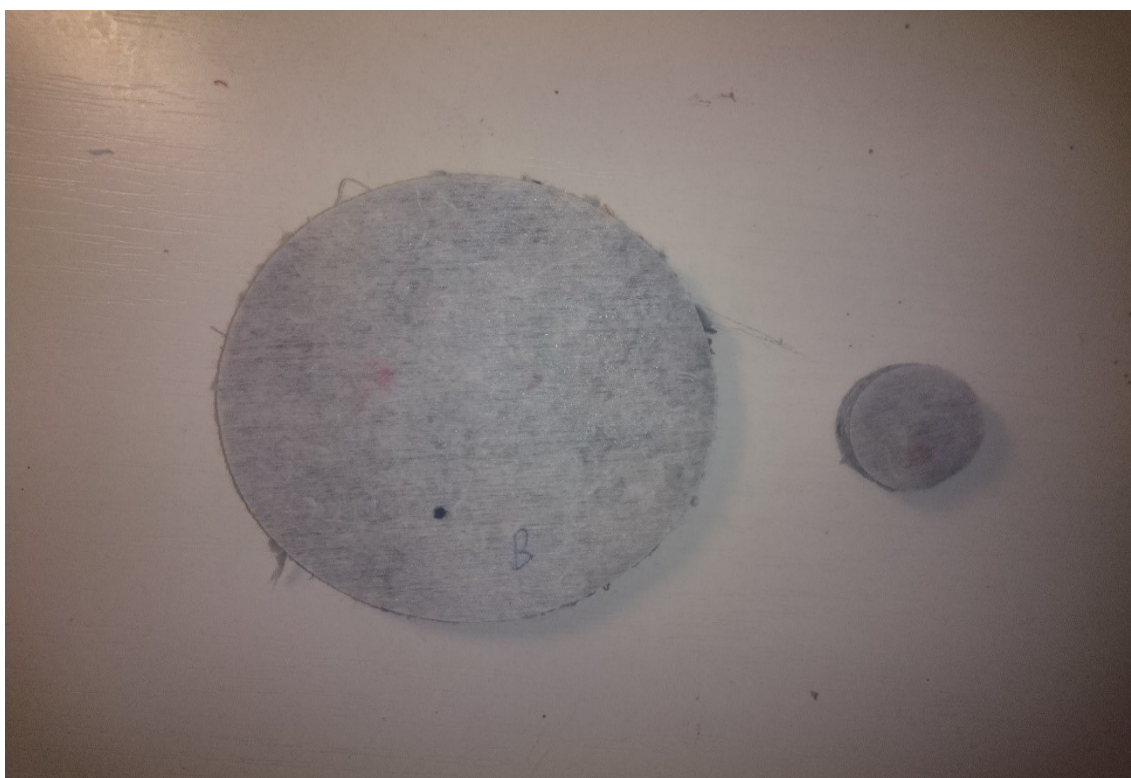
průměrných hodnot mezi různými materiály. U vzorku číslo 6, který je bez úpravy, jsou směrodatné odchylky menší než u vzorků s různými úpravami, což dokládá zvýšenou variabilitu činitele zvukové pohltivosti u upravovaných vzorků.

Nejlepší výsledky při daných výrobních parametrech plošná hmotnost 600 g/m^2 a tloušťka materiálu $10 \pm 1,5 \text{ mm}$ (kapitola 7.2 Tab.3) prokázal vzorek číslo 6, který není nijak upraven a vzorek číslo 2, jehož povrch je upraven perforovanou fólií a flísem. Měření, navzdory předpokladu prokázalo, že pro tento typ výrobku a jeho výrobní technologii není výhodné jakékoliv další úpravy pro zlepšení činitele zvukové pohltivosti.

8.4 Obrázky připravených vzorků na měření



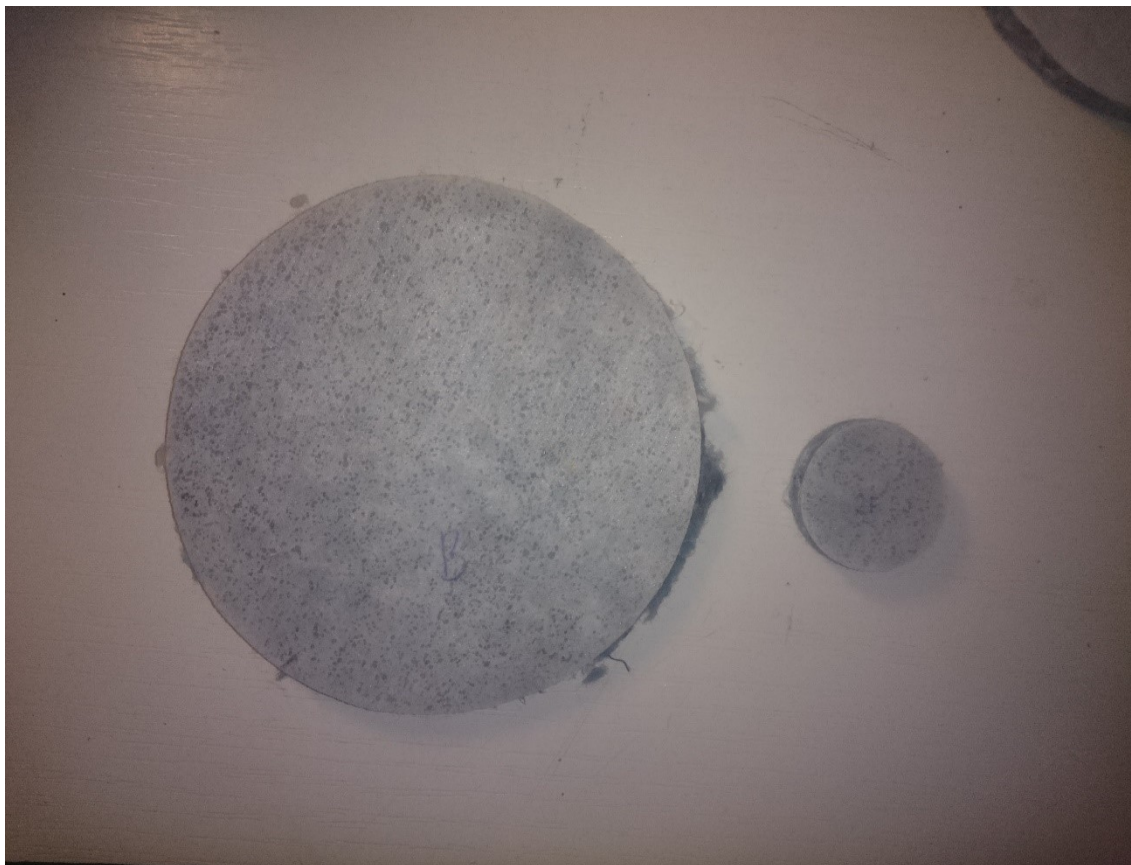
Obr. 13 carNETEX 1.



Obr. 14 carNETEX 2.



Obr. 15 carNETEX 3.



Obr. 16 carNETEX 4.



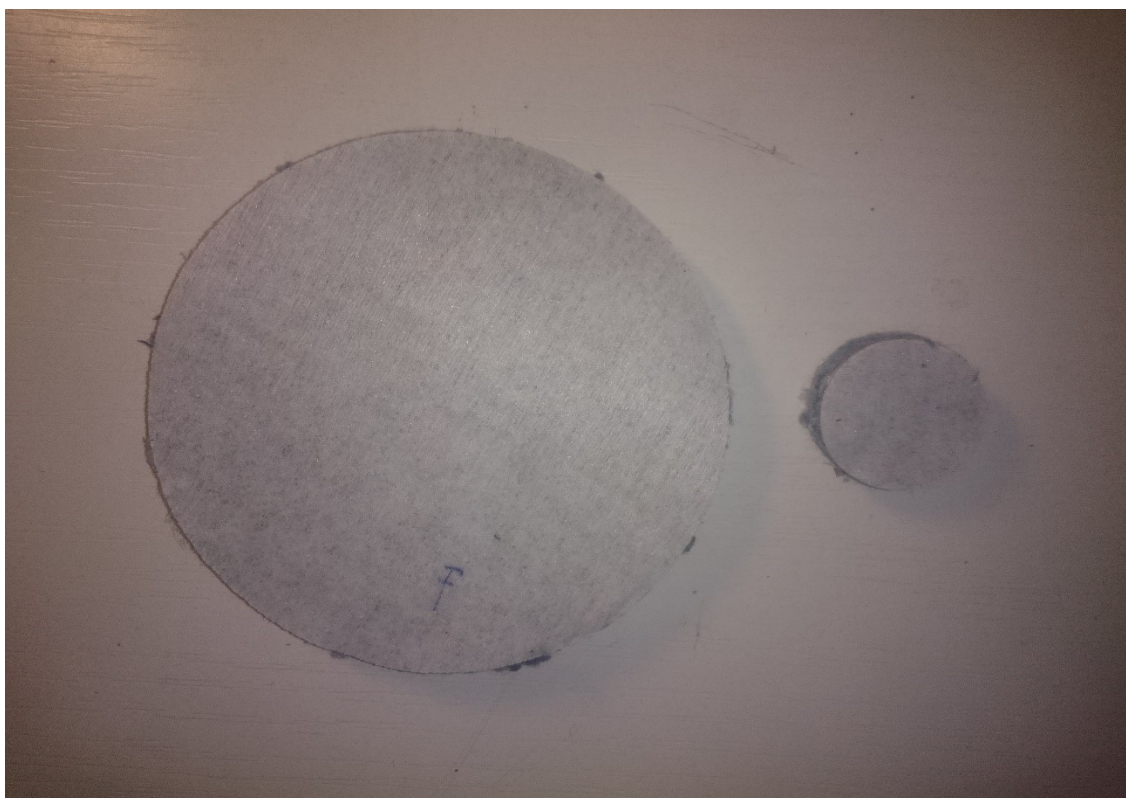
Obr. 17 carNETEX 5.



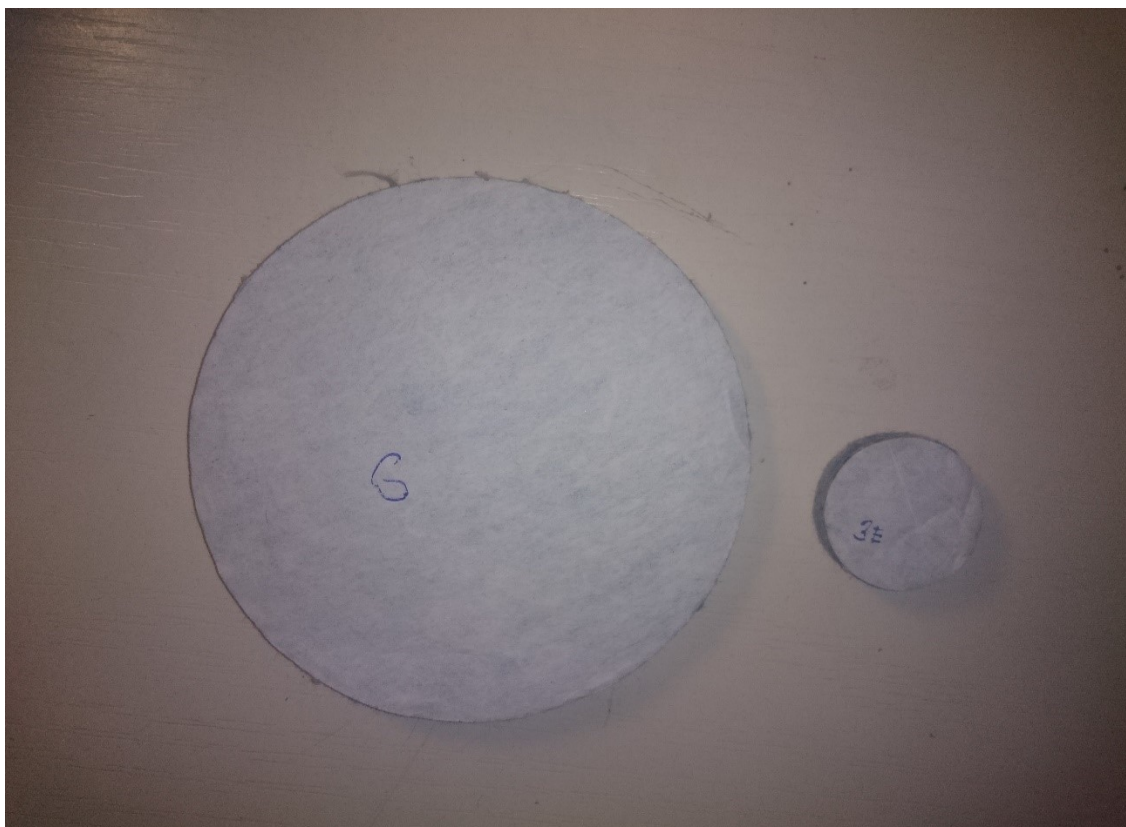
Obr. 18 carNETEX 6.



Obr. 19 carNETEX 7.



Obr. 20 carNETEX 8.



Obr. 21 carNETEX 9.

8.5 Zpracování výsledků

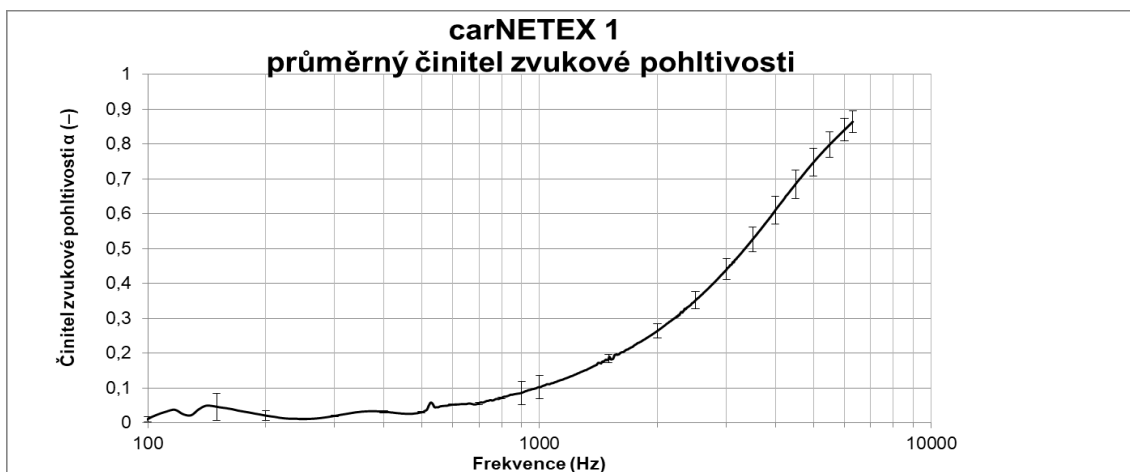
carNETEX 1

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 32 g/m² per. papír + 50 g/m² vlies.

Tab. 6 hmotnost a tloušťka vzorků.

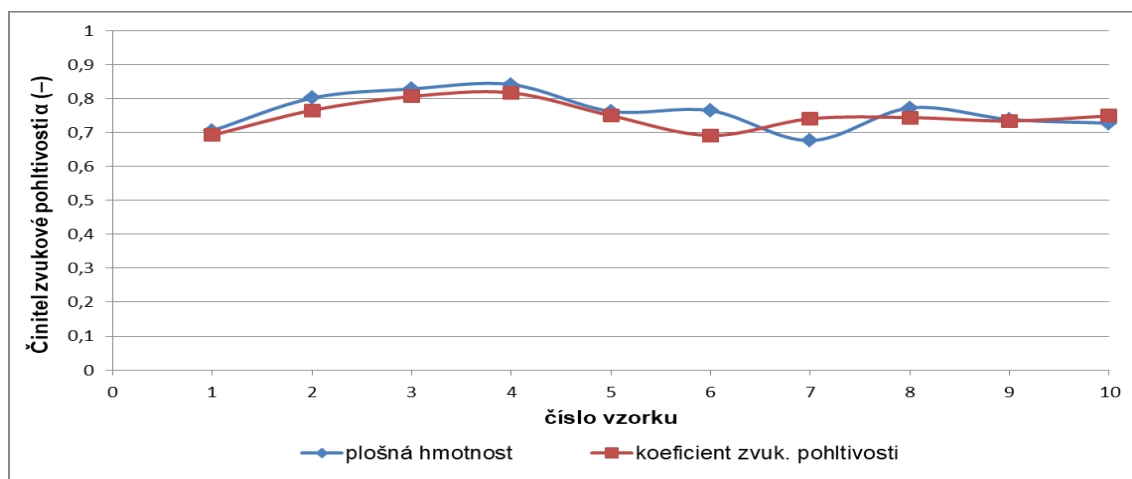
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	5,51	0,49	6,00	705	8,80
2	6,30	0,52	6,82	801	9,10
3	6,53	0,52	7,05	828	8,73
4	6,68	0,48	7,16	841	8,95
5	6,13	0,44	6,57	762	8,65
6	6,13	0,36	6,49	764	8,62
7	5,30	0,46	5,76	676	9,05
8	6,10	0,47	6,57	772	9,05
9	5,71	0,57	6,28	738	8,47
10	5,73	0,46	6,19	727	8,75
průměr	6,01	0,48	6,49	762+/-79	8,82+/-0,35

Graf 1 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



V grafu lze vidět, že zvuková pohltivost se začíná výrazně zvyšovat až od frekvence 1000 Hz a poté roste do svého maxima při frekvenci více než 6000 Hz.

Graf 2 závislost činitele zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



Z grafu lze vyčíst, že u vzorků číslo 6, 7 a 8 neplatí, že čím vyšší je plošná hmotnost tím vyšší je činitel zvukové pohltivosti.

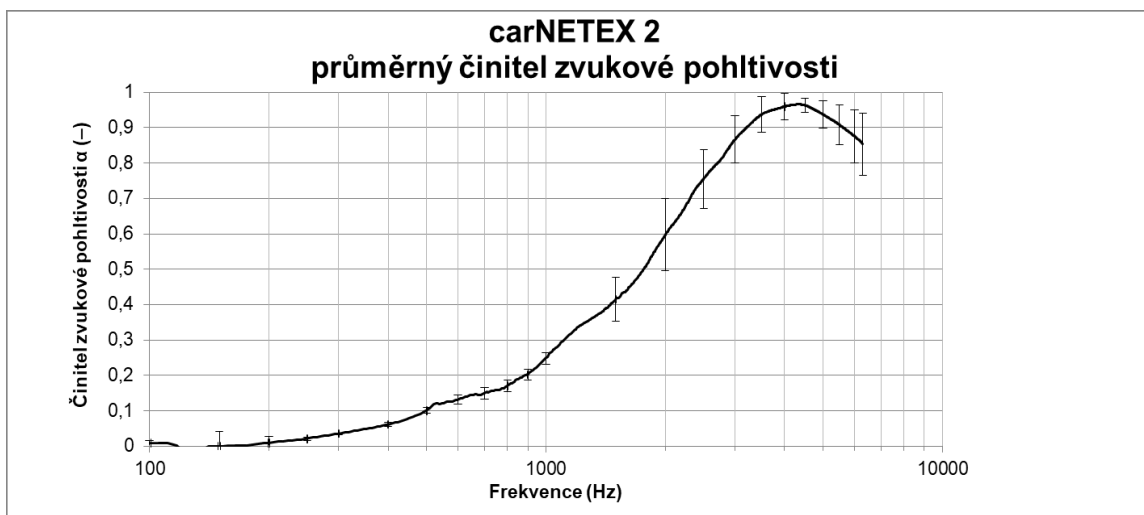
carNETEX 2

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 20 g/m² per. fólie + 50 g/m² flies.

Tab. 7 hmotnost a tloušťka vzorků.

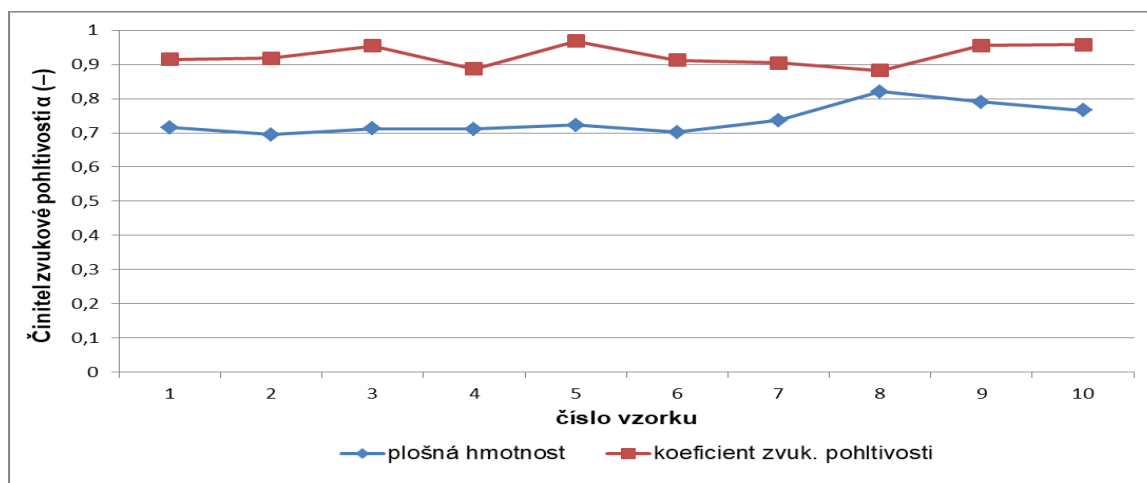
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	5,54	0,56	6,10	716	8,45
2	5,40	0,52	5,92	695	8,96
3	5,57	0,50	6,07	712	8,63
4	5,62	0,44	6,06	711	8,29
5	5,69	0,47	6,16	723	8,63
6	5,42	0,56	5,98	702	8,42
7	5,75	0,53	6,28	737	8,36
8	6,75	0,52	7,27	820	8,89
9	6,27	0,46	6,73	790	8,62
10	6,01	0,52	6,53	766	8,99
průměr	5,80	0,51	6,31	741+/-79	8,62+/-0,37

Graf 3 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



Z grafu lze pozorovat plynule narůstající činitel zvukové pohltivosti již od nízkých počátečních frekvencí. Největších hodnot činitele zvukové pohltivosti dosahuje při frekvenci 4000 Hz.

Graf 4 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



Z grafu lze vyčíst, že činitel zvukové pohltivosti není závislý na plošné hmotnosti u všech měřených vzorků.

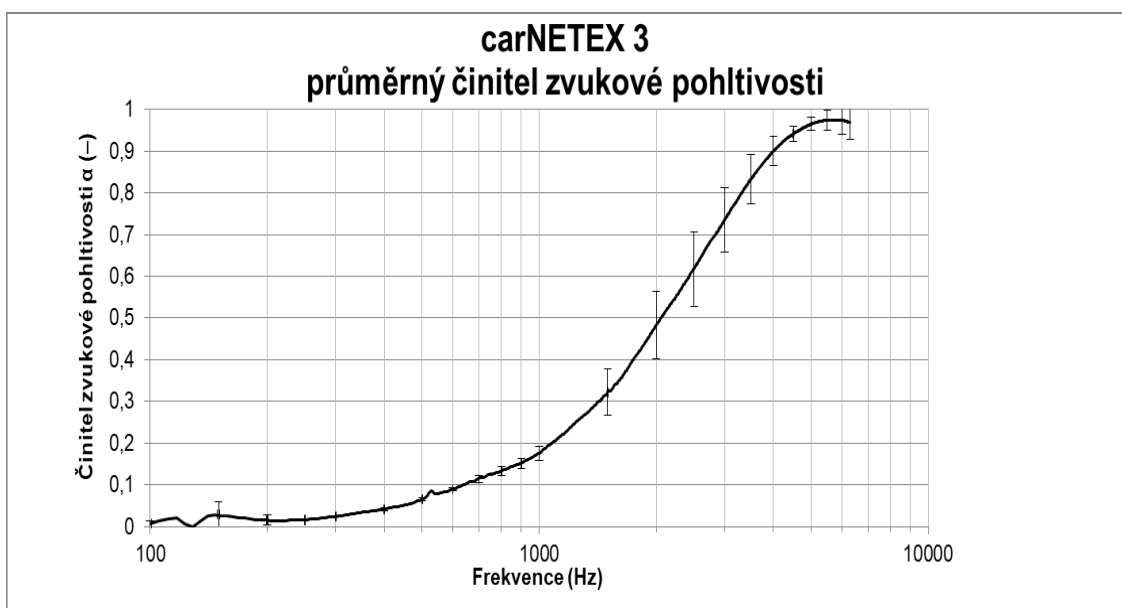
carNETEX 3

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 50 g/m² vlies.

Tab. 8 hmotnost a tloušťka vzorků.

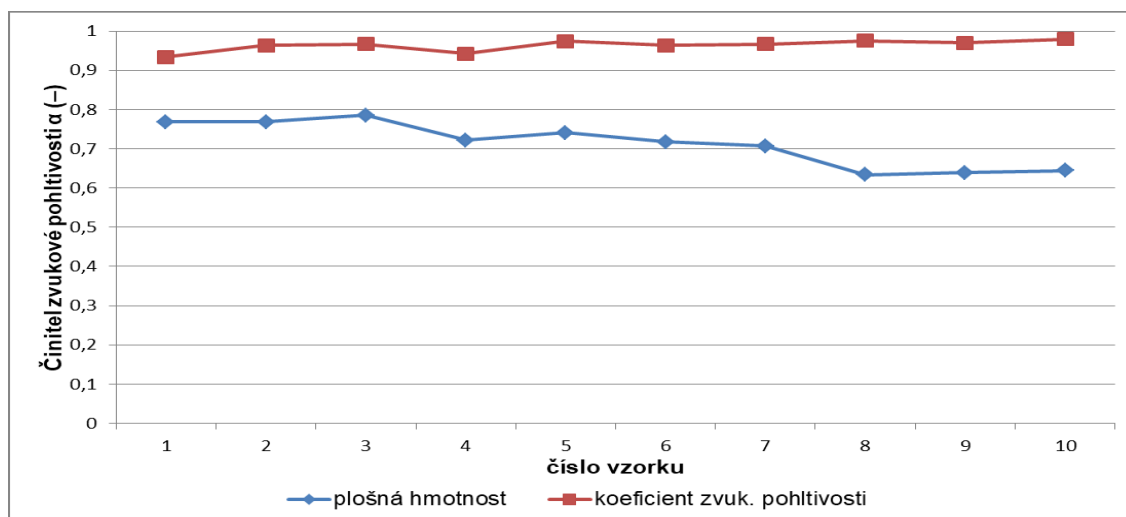
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	5,80	0,75	6,55	769	8,20
2	5,90	0,65	6,55	769	8,51
3	6,13	0,56	6,69	786	8,56
4	5,75	0,40	6,15	722	8,44
5	5,85	0,46	6,31	741	8,60
6	5,55	0,56	6,11	718	8,69
7	5,62	0,40	6,02	707	8,85
8	4,96	0,44	5,40	634	8,30
9	4,97	0,47	5,44	639	8,42
10	5,08	0,40	5,48	644	8,75
průměr	5,56	0,51	6,07	713+/-79	8,53+/-0,33

Graf 5 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



Z grafu je zřejmé, že činitel zvukové pohltivosti narůstá plynule od počátečních frekvencí až do svého maxima při frekvenci 5500 Hz.

Graf 6 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



Z grafu lze vidět, že činitel zvukové pohltivosti vzorku číslo 8 není závislý na jeho plošné hmotnosti.

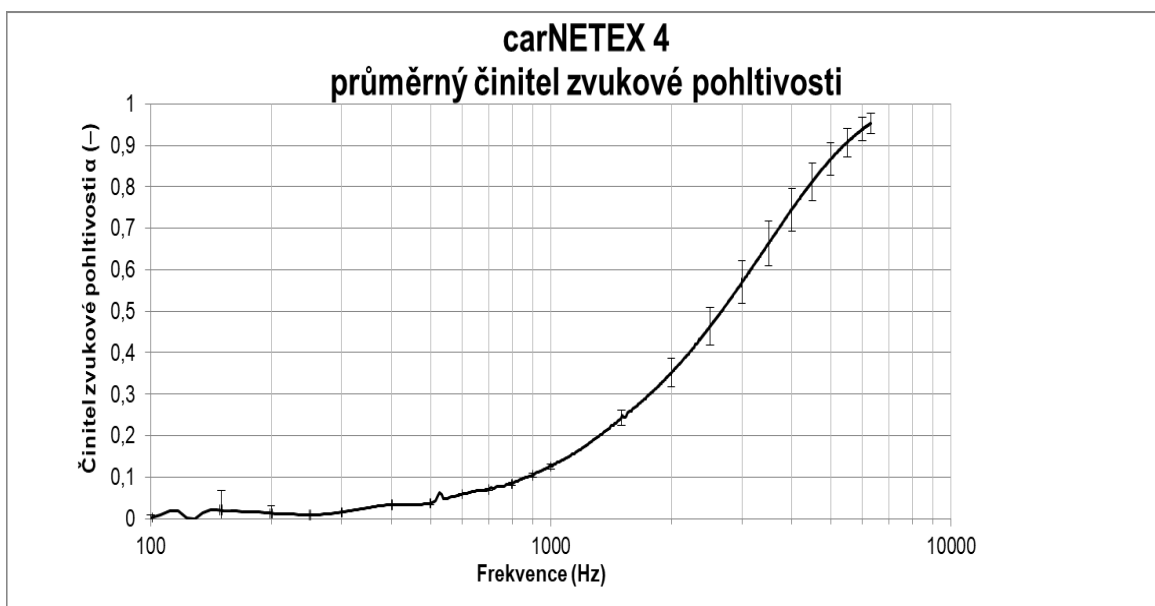
carNETEX 4

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 32 g/m² per. papír.

Tab. 9 hmotnost a tloušťka vzorků.

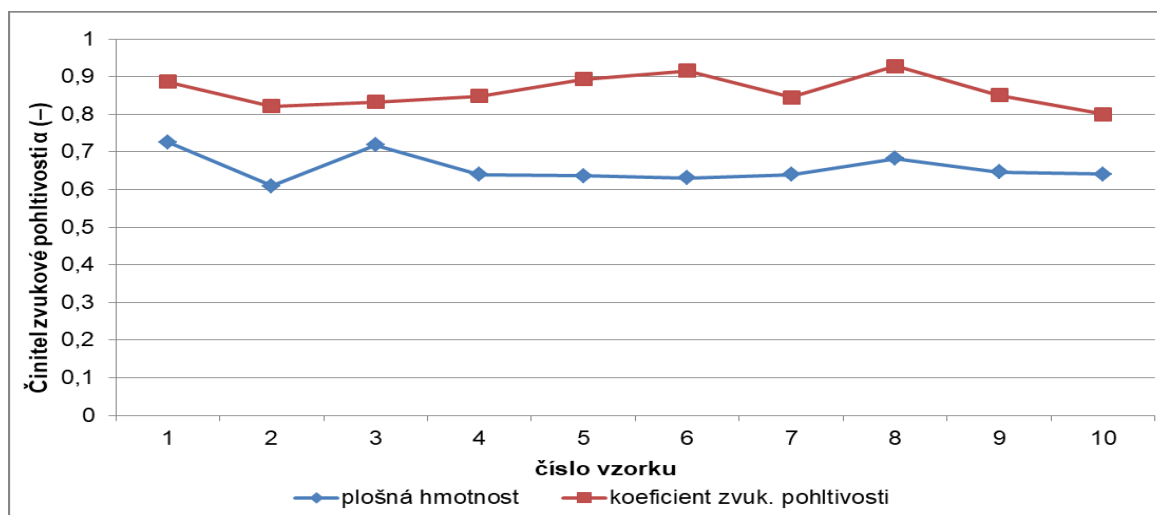
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	5,8	0,39	6,19	726	8,45
2	4,8	0,4	5,2	610	8,35
3	5,6	0,52	6,12	718	8,10
4	4,95	0,5	5,45	640	8,12
5	4,95	0,47	5,42	636	8,69
6	4,98	0,4	5,38	631	8,05
7	5,03	0,42	5,45	640	8,20
8	5,21	0,6	5,81	682	8,36
9	5,1	0,41	5,51	647	8,30
10	5,05	0,41	5,46	641	8,10
průměr	5,147	0,452	5,599	657+/-69	8,27+/-0,42

Graf 7 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



V grafu je vidět, že činitel zvukové pohltivosti pozvolna roste až do svého maxima, které dosahuje při frekvenci více než 6000 Hz.

Graf 8 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



Z grafu č. 8 lze vyčíst, že pro vzorky číslo 4,5,6 a 7 neplatí závislost mezi plošnou hmotností a činitelem zvukové pohltivosti.

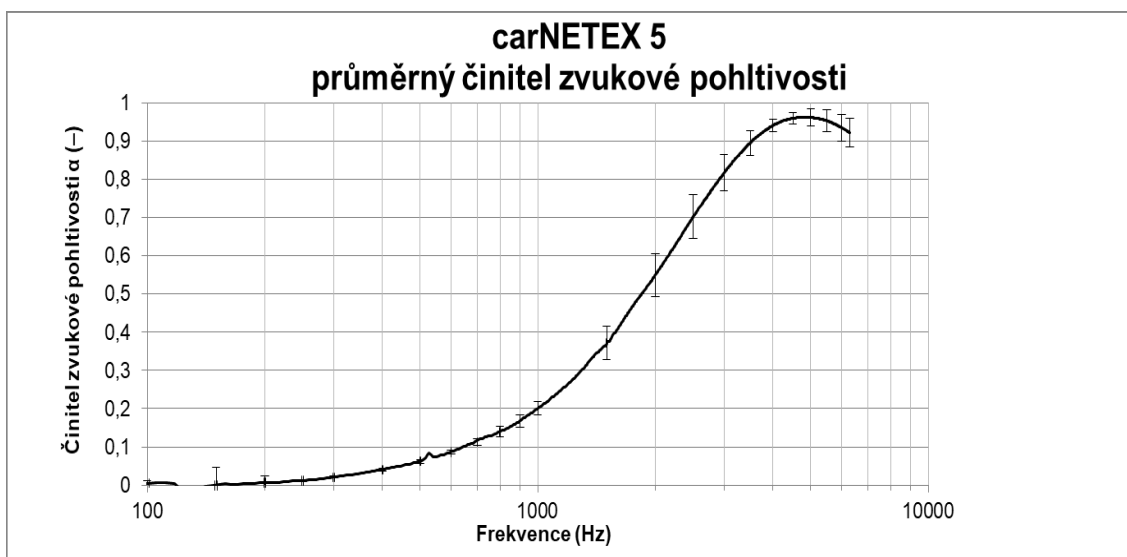
carNETEX 5

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 25 g/m² per.folie.

Tab. 10 hmotnost a tloušťka vzorků.

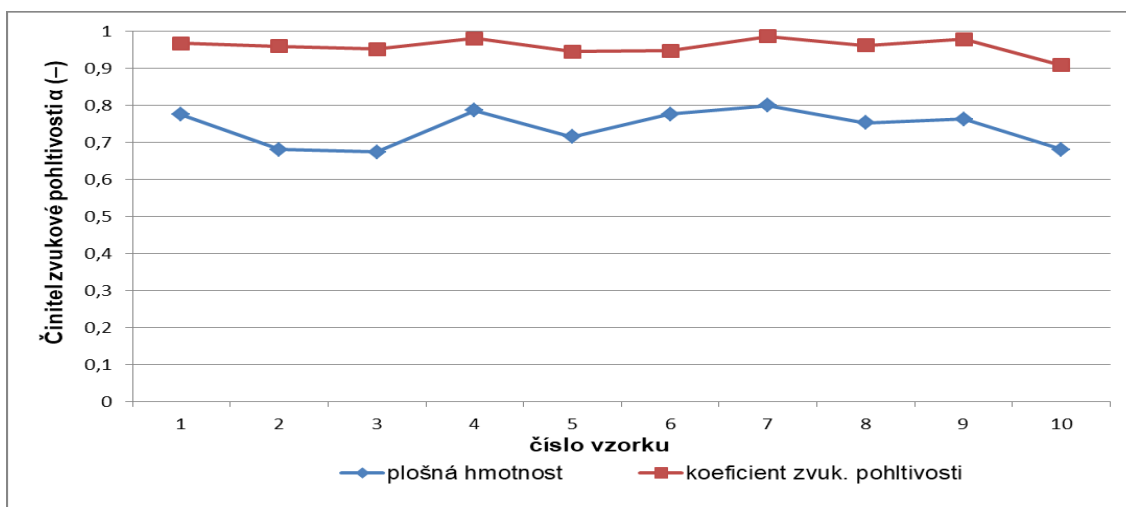
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	6,11	0,48	6,59	774	8,41
2	5,34	0,45	5,79	680	9,00
3	5,27	0,46	5,73	673	8,26
4	6,20	0,49	6,69	786	8,29
5	5,57	0,51	6,08	714	8,53
6	6,00	0,60	6,60	775	8,20
7	6,10	0,70	6,80	799	8,56
8	5,95	0,45	6,40	752	8,74
9	5,90	0,59	6,49	762	8,13
10	5,40	0,39	5,79	680	8,63
průměr	5,78	0,51	6,30	739+/-60	8,48+/-0,52

Graf 9 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



Z grafu č. 9 lze vidět, že činitel zvukové pohltivosti je plynule rostoucí až do svého maxima při frekvenci 5000 Hz.

Graf 10 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



V grafu lze vidět závislost plošné hmotnosti na všech měřených vzorcích, kdy s rostoucí plošnou hmotností roste činitel zvukové pohltivosti a naopak.

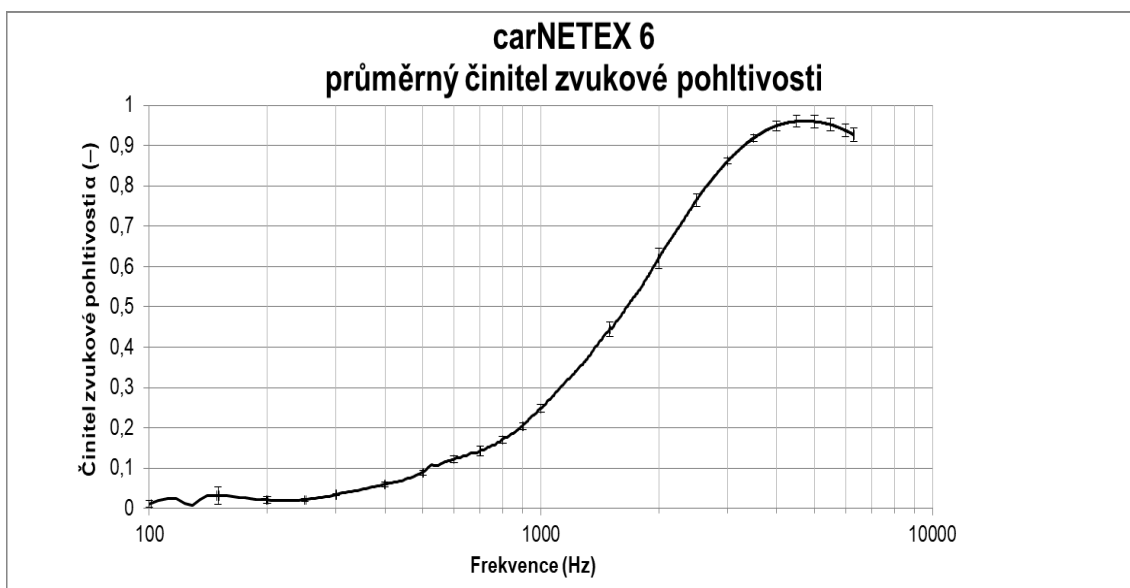
carNETEX 6

Vzorek carNETEX 600 g/m² bez úpravy.

Tab. 11 hmotnost a tloušťka vzorků.

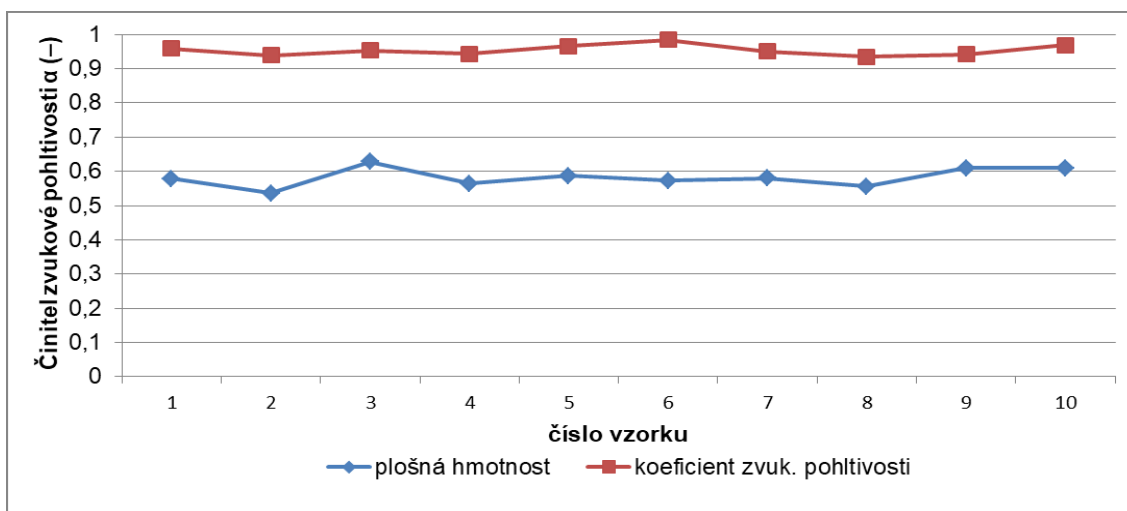
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	4,60	0,33	4,93	579	8,40
2	4,18	0,39	4,57	537	8,60
3	4,90	0,45	5,35	628	8,35
4	4,39	0,42	4,81	565	8,14
5	4,58	0,42	5,00	587	8,46
6	4,54	0,34	4,88	573	8,17
7	4,60	0,34	4,94	580	8,40
8	4,31	0,42	4,73	555	8,74
9	4,79	0,40	5,19	610	8,65
10	4,79	0,40	5,19	610	8,20
průměr	4,57	0,39	4,96	582+/-46	8,41+/-0,33

Graf 11 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



Z grafu je patrné, že činitel zvukové pohltivosti dosahuje svých maximálních hodnot kolem frekvence 4500 Hz.

Graf 12 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



Z grafu je patrné, že pro všechny měřené vzorky platí závislost mezi plošnou hmotností a činitelem zvukové pohltivosti.

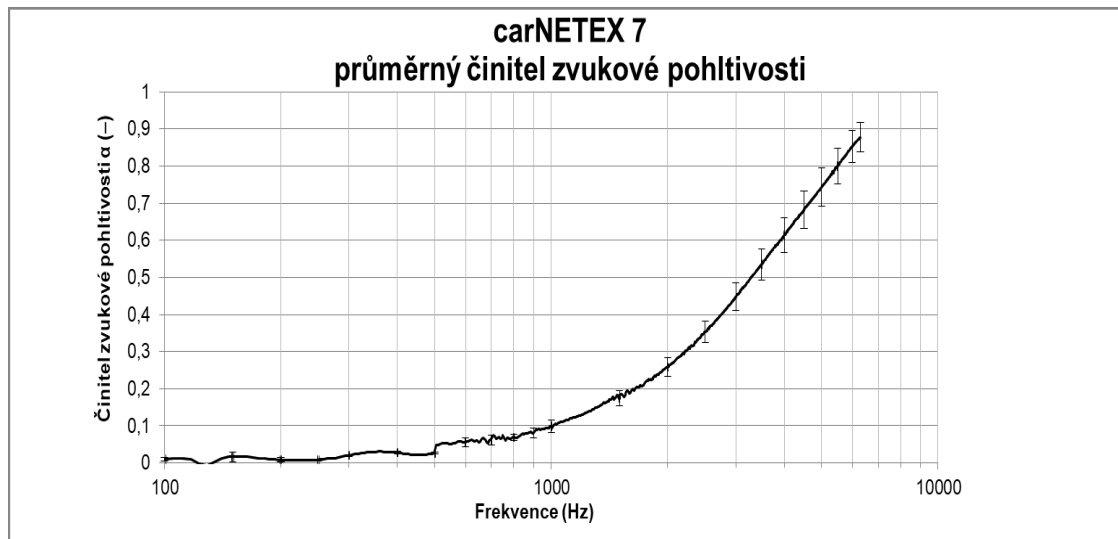
carNETEX 7

Vzorek carNETEX 600g/m² + 5 g/m² nosič pro nanovláknennou vrstvu bez této vrstvy.

Tab. 12 hmotnost a tloušťka vzorků.

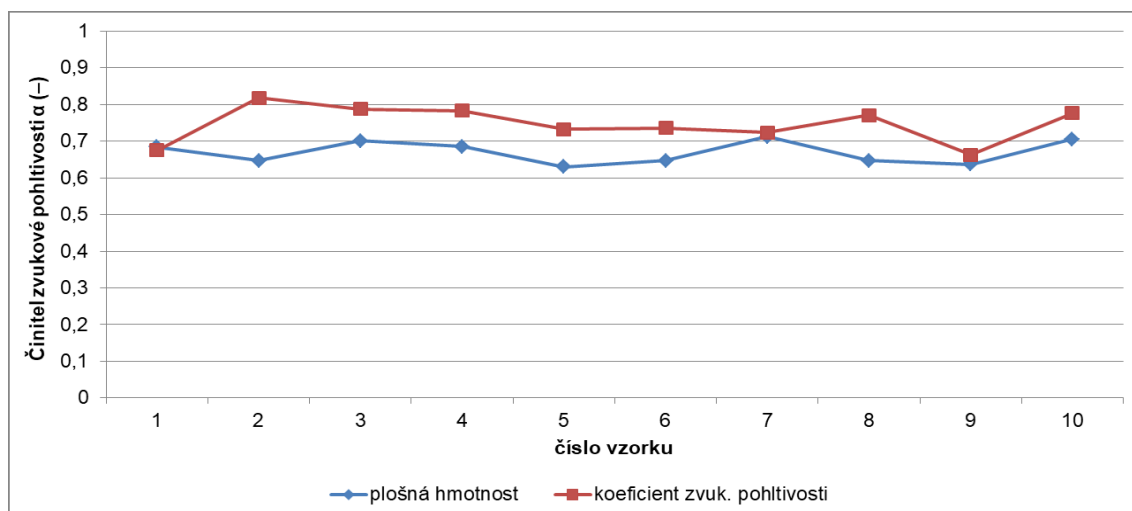
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	5,45	0,37	5,82	684	8,18
2	5,02	0,49	5,51	647	8,78
3	5,52	0,44	5,96	700	8,79
4	5,38	0,45	5,83	685	8,85
5	4,96	0,40	5,36	630	8,74
6	5,08	0,43	5,51	647	8,26
7	5,69	0,37	6,06	712	8,41
8	5,10	0,41	5,51	647	8,36
9	5,07	0,35	5,42	637	8,29
10	5,51	0,49	6,00	705	8,67
průměr	5,28	0,42	5,70	669+/-43	8,53+/-0,35

Graf 13 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



Z grafu je patrné, že činitel zvukové pohltivosti roste až ke konečné frekvenci 6300 Hz.

Graf 14 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



V grafu lze vidět, že se nepotvrdila závislost plošné hmotnosti na činiteli zvukové pohltivosti u vzorků číslo 1,2,3,7,8.

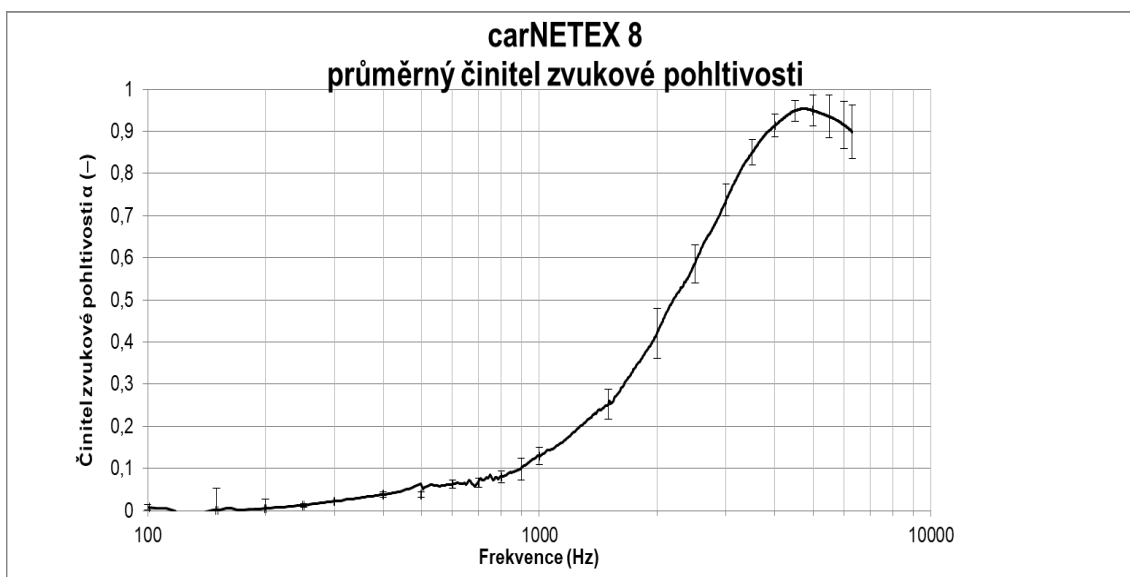
carNETEX 8

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 0,23 g/m² nanovláknenná vrstva.

Tab. 13 hmotnost a tloušťka vzorků.

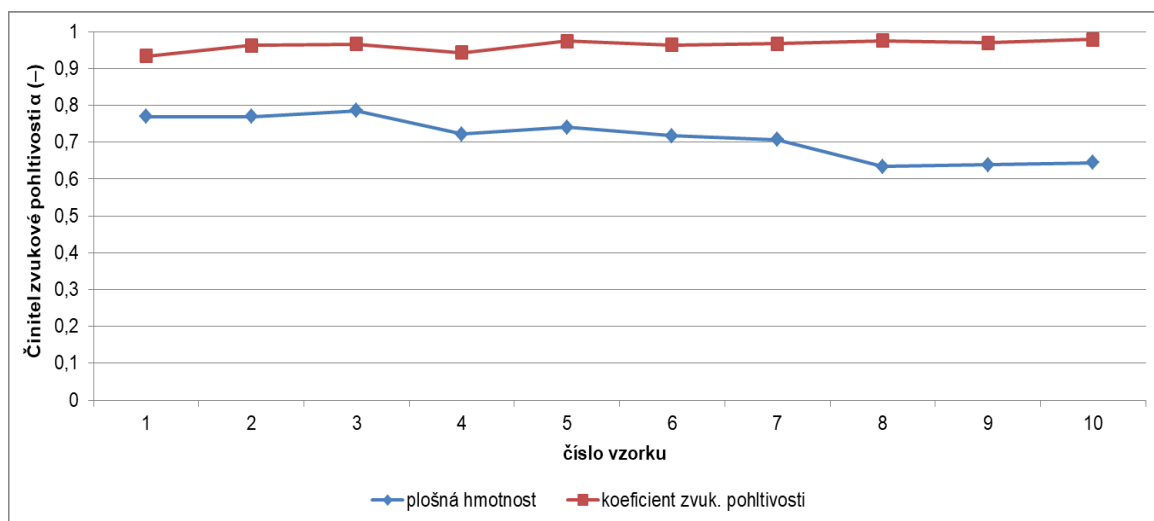
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	4,20	0,44	4,64	545	8,95
2	5,29	0,45	5,74	674	8,62
3	5,00	0,34	5,34	627	9,10
4	4,98	0,42	5,40	634	8,40
5	5,01	0,36	5,37	631	8,70
6	4,62	0,34	4,96	583	8,63
7	5,40	0,38	5,78	679	8,65
8	5,01	0,38	5,39	633	8,45
9	5,61	0,37	5,98	702	8,90
10	5,03	0,52	5,55	652	8,63
průměr	5,02	0,40	5,42	636+/-91	8,70+/-0,40

Graf 15 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



V grafu můžeme pozorovat rostoucí průběh činitele zvukové pohltivosti až ke svému maximu, které se pohybuje kolem frekvence 4500 Hz.

Graf 16 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



Z grafu můžeme pozorovat, že pouze vzorek číslo 8 neodpovídá závislosti plošné hmotnosti na činiteli zvukové pohltivosti.

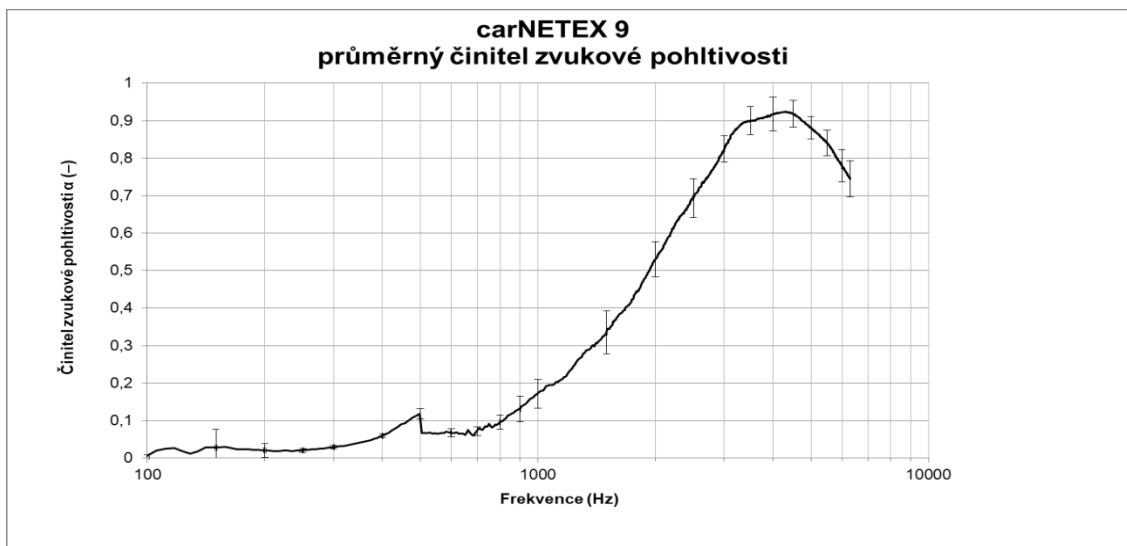
carNETEX 9

Vzorek carNETEX 600 g/m² + 2,8 g/m² nanovláknenné vrstvy.

Tab. 14 hmotnost a tloušťka vzorků.

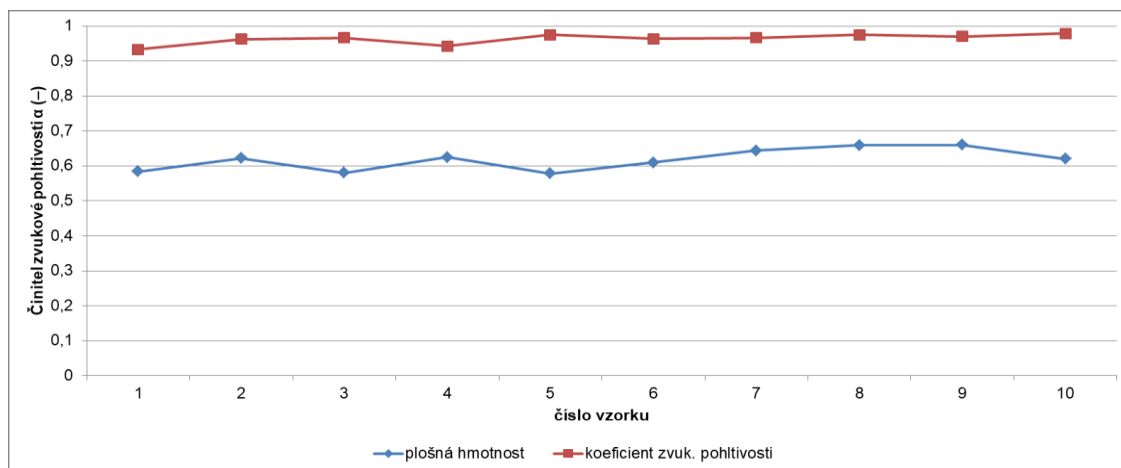
číslo měření	velký vzorek (g)	malý vzorek (g)	součet (g)	plošná hmotnost (g/m ²)	tloušťka (mm)
1	4,98	0,45	5,43	584	8,68
2	4,60	0,38	4,98	622	8,94
3	4,90	0,40	5,30	581	8,67
4	4,50	0,45	4,95	625	8,74
5	4,96	0,37	5,33	578	9,10
6	4,60	0,33	4,93	610	8,65
7	4,79	0,41	5,20	644	9,03
8	5,10	0,39	5,49	659	8,47
9	5,20	0,42	5,62	660	9,10
10	5,24	0,39	5,63	620	8,59
průměr	4,89	0,40	5,29	621+/-43	8,80+/-0,33

Graf 17 průměrný činitel zvukové pohltivosti se směrodatnou odchylkou.



Z grafu lze vidět, rostoucí činitel zvukové pohltivosti, kdy při frekvenci 500 Hz klesne jeho hodnota a poté je opět rostoucí až do svého maxima kolem frekvence 4500 Hz.

Graf 18 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.



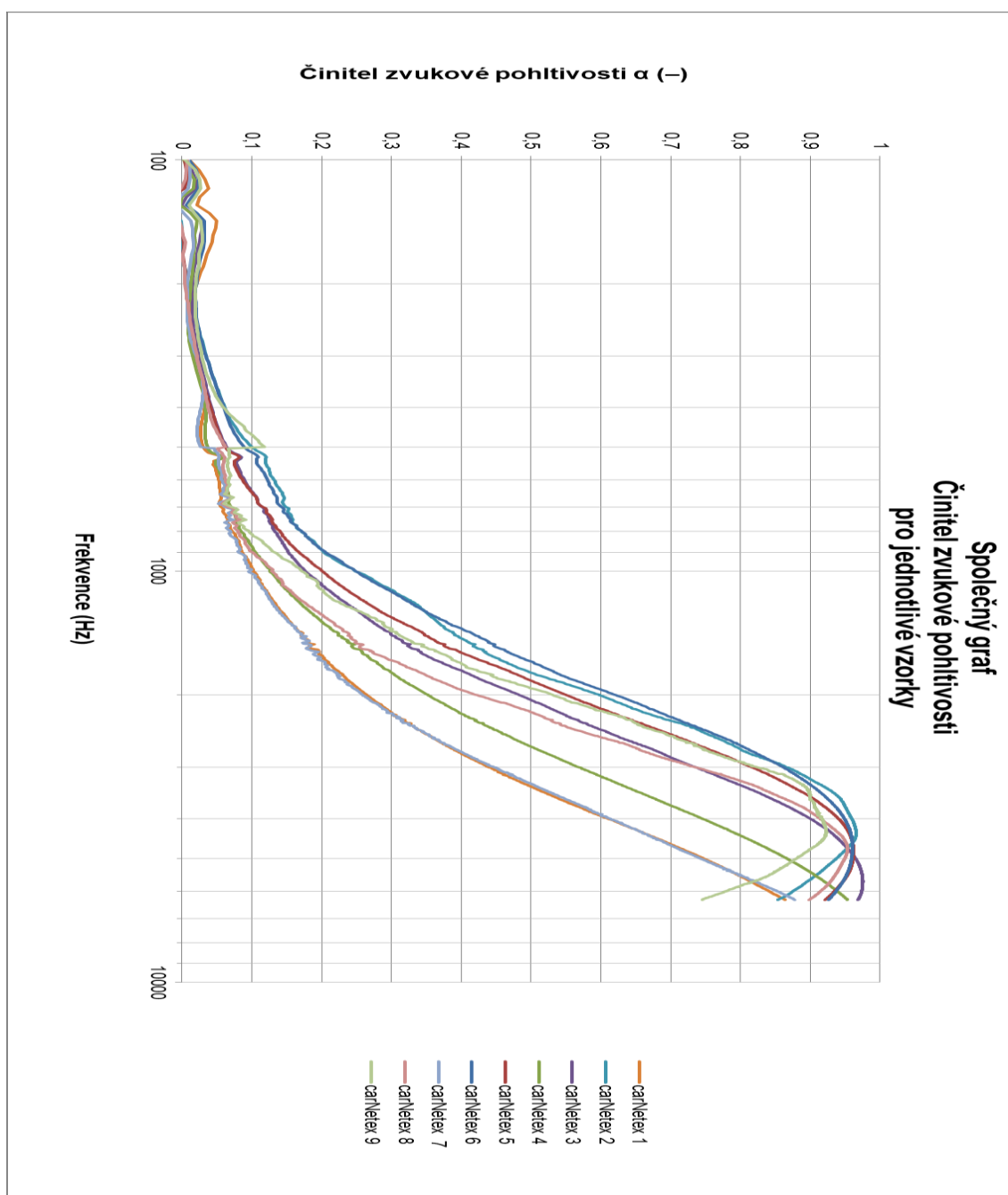
Z grafu lze pozorovat, že u vzorku číslo 3,4,5,6, a 10 neplatí závislost plošné hmotnosti na činiteli zvukové pohltivosti.

8.6 Průměrné výsledky všech vzorků

Tab.15 naměřená plošná hmotnost a tloušťka vzorků.

číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9
průměrná plošná hmotnost (g/m ²)	762+/-79	741+/-79	713+/-79	657+/-69	739+/-60	582+/-46	669+/-43	636+/-91	621+/-43
průměrná tloušťka (mm)	8,82+/-0,35	8,62+/-0,37	8,53+/-0,33	8,27+/-0,42	8,48+/-0,52	8,41+/-0,33	8,53+/-0,35	8,70+/-0,40	8,80+/-0,33

Graf 19 průměrné činitele zvukové pohltivosti všech vzorků.



V grafu je vidět, že výsledné průměrné hodnoty činitele zvukové pohltivosti všech měřených vzorků mají stejný či velmi podobný průběh a jejich hodnoty jsou závislé spíše na plošné hmotnosti a tloušťce nikoliv na jednotlivé úpravě vzorků.

9. Závěr

Bakalářská práce popisuje mechanické vlnění známé také jako zvuk. Dále se zabývá problematikou zvukové pohltivosti v oblasti porózních materiálů.

V teoretické části práce je podrobněji zpracováno rozdělení akustiky, šíření zvuku a také akustická pohltivost vlákenných materiálů, kde je popsána mechanika pohlcování a také důležité charakteristiky a jejich závislost na zvukové pohltivosti. Dále se pojednává o absorpci mechanického vlnění z hlediska vlákenných materiálů. Dále bylo popsáno různých metod měření zvukové pohltivosti. V poslední kapitole teoretické části bylo popsáno technologie výroby netkaných desek carNETEX.

Druhá část této práce se věnuje měřením činitele zvukové pohltivosti na 9 různě upravených vzorcích a samotnému vyhodnocení výsledků. Kde bylo od každého vzorku provedeno 10 měření a vyhodnocena základní statistika jako je střední hodnota činitele zvukové pohltivosti a směrodatné odchylky pro daný vzorek.

Samotné výsledky měření dopadly za očekávání, díky specifičnosti použitého materiálu a jeho parametrům, nebyly projeveny rezonanční vlastnosti aplikovaných membrán na podkladních vlákenných deskách. Ale i tak lze říci, že zkoušený materiál prokazuje velmi dobré zvukově pohltivé vlastnosti při relativně nízké tloušťce materiálu.

Studované netkané desky jsou používány především v dopravním průmyslu jako akusticko pohltivé materiály. Velkou výhodou těchto materiálů je jejich dobrá zpracovatelnost a především jejich ekonomická dostupnost.

10. Seznam literatury

- [1] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1996. ISBN 80-719-6116-7.
- [2] YAN, X. a X. TANG. *Multi-layer fibrous structures for noise reduction* [online]. 2017, 10 [cit. 2017-12-01]. DOI: 10.1080/00405000.2017.1315793. Dostupné z: <http://www.tandf.co.uk/journals/titles/00405000.asp>
- [3] KALINOVÁ, Klára. *Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury*. V Liberci: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-708-3997-X.
- [4] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2460-1.
- [5] HOSTAČNÁ, P.: „*Studium akustických vlastností vybraných textilních materiálů*“. Bakalářská práce FT UTB 2008, 70 stran.
- [6] VAŠUT, S.: *Polymerní recykláty pro snižování hluku a vibrací*. Habilitační práce, VUT Brno, 1996, 112 s
- [7] KOLMER, F., KYNCL, J. *Prostorová akustika*. 1.vydání. SNTL Praha, 1980.
- [8] ZWIKKER, C., KOSTEN, C. W. *Sound Absorbing Materials*. Elsevier Pub. Co., NY, 1949
- [9] ŠKVOR, Z. *Akustika a elektroakustika*. 1. vydání Academia Praha, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [10] AKUSTIKA. *WIKIPEDIA* [online].[cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Akustika>
- [11] KOVAŘÍK, Filip. *Studium akustických vlastností uzavřených prostor*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] KALINOVÁ, Klára. Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. *Journals of nanomaterials* [online]. 2011, 2017 [cit. 2017-12-01]. DOI: 10.1155/2011/265720. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2011/265720>
- [13] REICHL, Jaroslav. *Odras zvuku*. *Fyzika.jreichl.com* [online]. [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/197-odraz-zvuku-pohlcovani-zvuku>
- [14] STEINER, David. *Akustika* [online]. Praha, 2005 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.steiner.cz/david/akustika/>
- [15] VLACHOVÁ, Magda. *Mechanické kmitání a vlnění* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1421/podzim2008/VH_747a/kmity_vlny_-_Magda_Vlachova.pdf
- [16] LIBŘICKÝ, Stanislav. *Hluk a vibrace u vzduchotechnických zařízení*[online]. Brno, 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86665
- [17] NOVÝ, Richard a Miroslav KUČERA. *Snižování hluku a vibrací* [online]. Praha, 2009 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf
- [18] JULINA, Jiří. *Akustické vlastnosti vybraných stavebních materiálů* [online]. Praha, 2009 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z:

https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf

[19] VAŠINA, Martin. *Studium materiálů z hlediska a tlumení zvuku a vibrací* [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4218-4.pdf>. Teze habitační práce. Vysoké učení technické v Brně.

[20] Environmentální fyzika. *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika

[21] KATRŇÁKOVÁ, Anna. *Akustika atrií* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/67968/F1-DP-2017-Katrnakova-Anna-DP.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce.

[22] BÍLEK, Ondřej. *Měření akustického výkonu intenzivní sondou* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41980. Bakalářská práce.

[23] HRAZDÍRA, Ivo. *Vlastnosti zvuku* [online]. wikiskripta, 2011 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/w/Vlastnosti_zvuku

[24] 14. VAVERKA, J., KALINOVÁ, K. *Nanovlákná v prostorové akustice II. Materiály pro stavbu*. 2008, sv. 6, s. 28-31. [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/nanovlakna-v-nbsp-prostorove-akustice-ii_101459.html

[25] JELÍNEK, Ondřej. *Akustika a protihluková opatření ve vzduchotechnice* [online]. 2009 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/10319-akustika-a-protihlukova-opatreni-ve-vzduchotechnice>

[26] SMETANA, C. a kol. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Sdělovací technika, Praha: 1998. ISBN 80-901936-2-5.

[27] BRABEC, Petr. *Rovnice postupné vlny* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/rovnice-postupne-vlny>

[28] BRABEC, Petr. *Interference vlnění* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://mog.wz.cz/fyzika/2rocnik/kap308.htm>

[29] STRUHAŘOVÁ, Veronika. *Polyuretany a jejich využití v technické akustice* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/41478020-Polyuretany-a-jejich-vyuziti-v-technicke-akustice-veronika-struharova.html>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[30] VALENTÝNA, Černá. *Principy pohlcování a izolace zvuku vláknennými materiály* [online]. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3095694/>. Bakalářská práce.

[31] LIM, Z.Y a A. PUTRA. Sound absorption performance of natural kenaf fibres. *E/sevier* [online]. 2012, , 7 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17305583>

[32] IRSÁK, Oldřich a KALINOVÁ, Klára. *Netkané textilie* [online]. Liberec [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/938/mod_resource/content/1/Oldrich%20Jirsak%20a%20Klara%20Kalinov%C3%A1.pdf. Skripta. TUL.

- [33] MOHAMMAD, Fardh a Zhangquing LIU. Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel. *Elsevier* [online]. 2017, , 7 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16306041>
- [34] OTHMANI, Chokri a Taktak MOHAMMED. Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes. *Elsevier* [online]. 2015, , 7 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17300385>
- [35] OZTURK M., KALINOVÁ K., NERGIS B., CANDAN C. „Comparison of Resonant Frequency of Nanofibrous Membrane and Homogenous Membrane Structure“, *Textile Research Journal*, published online before print June 13, in print in Volume 83 Issue 20 December, **2013**, DOI: 10.1177/0040517513490064, Print ISSN: 0040-5175, Online ISSN: 1746-7748
- [36] NA, Kelebek. Sound Absorbing Polyester Recycled Nonwovens for the Automotive Industry. *FIBRES & TEXTILES IN EASTERN EUROPE* [online]. 2016, , 6 [cit. 2018-01-02]. ISSN 1230-3666. Dostupné z: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=F4IELAYWZ4HZYVvMgGe&page=1&doc=3
- [37] OVIDIU, Vasile a HORATIU, Vermesan. Acoustic Performance of Composite Materials Made from Textile Waste. *ROMANIAN JOURNAL OF ACOUSTICS AND VIBRATION* [online]. 2015, , 5 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=F4IELAYWZ4HZYVvMgGe&page=1&doc=7
- [38] KUCUKALI-OZTURK, Merve, NERGIS, Banu a CANDAN, Cevza. Design of layered struktura with nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2017, 47(7), 1739-56 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1177/152808371770848. ISSN 1528-0837. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1528083717708483>
- [39] EGDE, Raghavendra R., S. BHAT, Gajanan a R. A. CAMPBELL. Thermal bonding of polypropylene films and fibers. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2008, 110(5), 3047-3058 [cit. 2018-03-06]. DOI: 10.1002/app.28901. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.28901>

11. Seznam obrázků

Obr. 1 šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch.....	17
Obr. 2 postupné vlnění v řadě bodů.....	18
Obr. 3 odvození postupného vlnění.....	19
Obr. 4 porózní polhcovač.....	26
Obr. 5 dopad zvuku na překážku.....	27
Obr. 6 porózní materiál s membránou.....	30
Obr. 7 konstrukce děrovaného panelu.....	31
Obr. 8 nano vlákenná membrána.	32
Obr. 9 řez impedanční trubicí.....	34
Obr. 10 schéma dozvukové místnosti.....	35
Obr. 11 rozdělení netkaných textilií podle technologie výroby.....	37
Obr. 12 schéma zpevňování vlákenné vrstvy.....	37
Obr. 13 carNETEX 1.....	49
Obr. 14 carNETEX 2.....	49
Obr. 15 carNETEX 3.....	50
Obr. 16 carNETEX 4.....	51
Obr. 17 carNETEX 5.....	51
Obr. 18 carNETEX 6.....	52
Obr. 19 carNETEX 7.....	53
Obr. 20 carNETEX 8.....	53
Obr. 21 carNETEX 9.....	54

12. Seznam tabulek a grafů

Tab. 1 rychlost zvuku.....	22
Tab. 2 závislost rychlosti zvuku na teplotě.....	23
Tab. 3 výrobní příkaz desek carNETEX.....	38
Tab. 4 číslo, název a úprava měřených vzorků.....	45
Tab. 5 technické specifikace materiálů pro úpravu vzorků.....	46
Tab. 6 hmotnost a tloušťka vzorků.....	54
Graf 1 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	54
Graf 2 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	55
Tab. 7 hmotnost a tloušťka vzorků.....	56
Graf 3 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	56
Graf 4 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	57
Tab. 8 hmotnost a tloušťka vzorků.....	58
Graf 5 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	58
Graf 6 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	59
Tab. 9 hmotnost a tloušťka vzorků.....	60
Graf 7 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	60
Graf 8 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	61
Tab. 10 hmotnost a tloušťka vzorků.....	62
Graf 9 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	62
Graf 10 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	63
Tab. 11 hmotnost a tloušťka vzorků.....	64
Graf 11 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	64
Graf 12 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	65
Tab. 12 hmotnost a tloušťka vzorků.....	66
Graf 13 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	66
Graf 14 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	67
Tab. 13 hmotnost a tloušťka vzorků.....	68

Graf 15 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	68
Graf 16 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	69
Tab. 14 hmotnost a tloušťka vzorků.....	70
Graf 17 průměrný činitel zvukové pohltivosti.....	70
Graf 18 závislost koeficientu zvuk. pohltivosti pro 5000 Hz na plošné hmotnosti.....	71
Tab. 15 hmotnost a tloušťka vzorků.	72
Graf 19 průměrné činitele zvukové pohltivosti všech vzorků.....	72